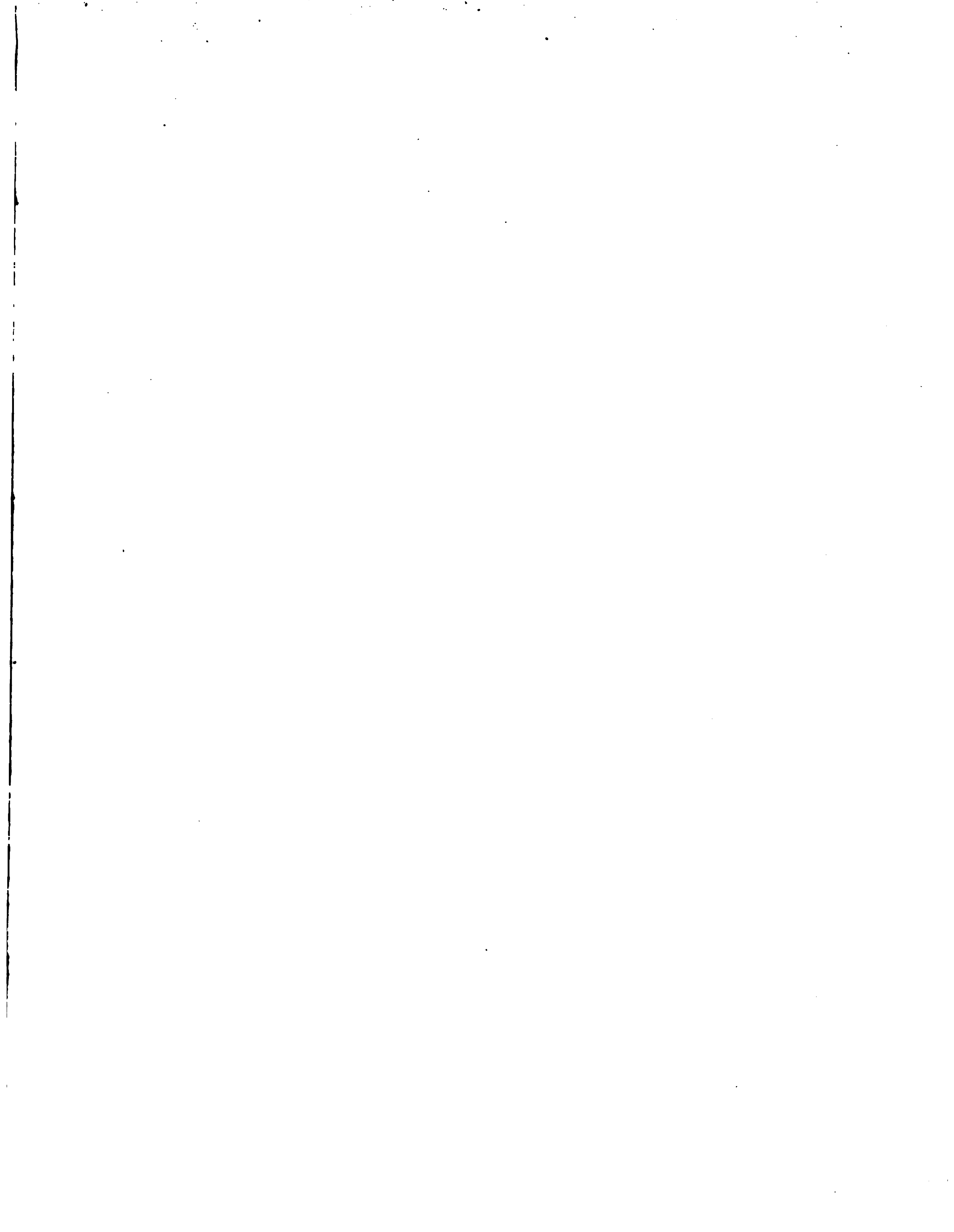

IM ZWANZIGSTEN
JAHRHUNDERT


XX





Tafel I.



Elektrische Effekt- und Reklamebeleuchtung Potsdamer Platz, Berlin.

Zu Simons: Die Starkstromtechnik.

DIE TE[illegible]CHNIK [illegible]ANZIGSTEN [illegible]RHUNDERT

[illegible]

GEH. REG.-RA[illegible]

PROFESSOR AN DER KÖNIGL. TECH[illegible]

——o——

DRITTER BAND

[illegible] GEWIN[illegible]G DES TECHNISCH[illegible] UN[illegible] [illegible]R ELEKTRISCHEN [illegible]

[illegible]



Elektrische Effekt- und Reklamebeleuchtung Potsdamer Platz, Berlin.

Zu Simons: Die Starkstromtechnik.

DIE TECHNIK IM ZWANZIGSTEN JAHRHUNDERT

[illegible]

GEH. REG. [illegible]

[illegible]

DIE GEWINNUNG [illegible]

UND [illegible]

BRAUNSCHWEIG 1912 [illegible]



Elek…

Die Str… technik.

DIE TECHNIK IM ZWANZIGSTEN JAHRHUNDERT

UNTER MITWIRKUNG HERVORRAGENDER VERTRETER DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN HERAUSGEGEBEN VON

GEH. REG.-RAT DR. A. MIETHE

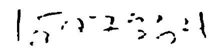
PROFESSOR AN DER KÖNIGL. TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZU BERLIN

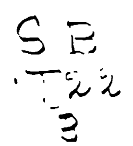
DRITTER BAND:

DIE GEWINNUNG DES TECHNISCHEN KRAFTBEDARFS UND DER ELEKTRISCHEN ENERGIE

BRAUNSCHWEIG 1912. VERLAG VON GEORGE WESTERMANN

Druck von George Westermann in Braunschweig.





INHALTSVERZEICHNIS

Die Umsetzung und Verwertung der Energie in Maschinen. Von Professor Dr.-Ing. Anton Gramberg (Danzig-Langfuhr) . . . . . Seite 3—109

Überblick über die heutigen Wärmekraftmaschinen. Von Professor K. Körner (Prag) . . . Seite 110—210

Wasserkraft und Windkraft. Von Dipl.-Ing. Jos. Scheuer (Berlin) S. 211—249

Die Starkstromtechnik. Von Professor Dr. K. Simons . . Seite 251—392

Die Elektrochemische Industrie. Von Professor Dr. K. Arndt (Charlottenburg) . . . . Seite 393—432

EINSCHALTBILDER

ABSCHNITT III

DIE GEWINNUNG DES TECHNISCHEN KRAFTBEDARFS

DIE UMSETZUNG UND VERWERTUNG DER ENERGIE IN MASCHINEN

VON ANTON GRAMBERG

1. UMSETZUNG NICHT ERZEUGUNG

Maschinen sollen Energie umsetzen und dadurch nutzbar machen. So setzt der Elektromotor elektrische Energie in mechanische Arbeit um, die Dampf- oder Gasmaschine setzt Wärme in mechanische Arbeit um, die Dynamomaschine dient umgekehrt der Umsetzung von mechanischer Arbeit in elektrischen Strom.

Umsetzung ist nicht Erzeugung; Energie kann nicht erzeugt werden, sondern wo eine Energieform erzeugt wird, da muß eine entsprechende Menge einer anderen Energieform verschwinden, an deren Stelle die scheinbar erzeugte tritt. Das entspricht dem Satze von der Erhaltung der Energie, von der Einheit der Naturkräfte.

Die Umsetzung der Energieformen geschieht an sich verlustlos. Aus jeder Maschine und aus jeder maschinellen Anordnung muß insgesamt die gleiche Energiemenge herausgehen, die in irgendeiner Form in sie hineingegangen ist; eine Aufspeicherung von Energie im Inneren der Maschine würde jedenfalls nur zeitweilig eintreten können. Trotzdem spricht man davon, eine Maschine arbeite mit größeren oder geringeren Verlusten, keine aber arbeite ohne Verluste. Das ist eine Ausdrucksweise, die daher rührt, daß nicht immer die Umsetzung so erfolgt, wie wir es wünschen. Soll ein Elektromotor die Energie des elektrischen Stromes in Arbeit umsetzen, so wäre es erwünscht, *nur* mechanische Arbeit aus dem Motor zu ziehen; tatsächlich ist es nicht zu vermeiden, daß ein Teil der eingeführten elektrischen Energie in Wärme verwandelt wird und dadurch praktisch verloren geht. Um einen Begriff von dem praktisch Erreichbaren zu geben, sei erwähnt, daß in Elektromotoren mittlerer Größe etwa 85 % der als Elektrizität hineingesandten Energie in Form von mechanischer Arbeit wieder zum Vorschein kommen, während 15 % verloren gehen, das heißt in für uns unbrauchbare Energieformen umgesetzt werden. Das ist ein außergewöhnlich günstiges Verhältnis: wenige andere Maschinenarten arbeiten mit nur 15 % Verlust. Der Elektromotor ist eine der vollkommensten Maschinenarten, die es gibt.

Man sagt wohl, der *Wirkungsgrad* (Nutzeffekt) jenes Elektromotors sei 85 %. Der Wirkungsgrad gibt also an, inwieweit die in eine Anlage hineingesandte Energie in dem gewollten Sinne verwendet wird. Der Wirkungsgrad könnte im günstigsten Falle 100 % werden, bleibt aber praktisch immer darunter, und es gibt Fälle, wo man mit Wirkungsgraden von 10 bis 15 % schon recht zufrieden ist. Das ist namentlich dann der Fall, wenn die gleiche Energiemenge nacheinander die verschiedensten Umwandlungen durchmacht, deren jede nur zum Teil in dem gewollten Sinne verläuft, deren jede also mit Verlusten verbunden ist, so daß sich die Verluste mehr und mehr häufen, um schließlich den größten Teil des Gesamten auszumachen. So etwa bei einer dampfbetriebenen Überlandzentrale: die in der Kohle schlummernde chemische Energie wird in der Dampfkesselfeuerung in Wärme verwandelt und die Wärme auf Wasserdampf übertragen; in der Dampfmaschine wird die Wärme des Dampfes in mechanische Arbeit, diese in der angekuppelten Dynamomaschine in elektrischen Strom

verwandelt; der Strom wird, natürlich auch mit gewissen Verlusten, fortgeleitet, um an den Verbrauchsstellen teils in Licht, teils mit Hilfe von Elektromotoren wieder in mechanische Arbeit, vielleicht auch um in galvanoplastischen Bädern wieder in chemische Energie verwandelt zu werden. Mit der Zahl der aufeinander folgenden Umwandlungen sinkt mehr und mehr der Wirkungsgrad der gesamten Übertragung.

Der Begriff des Wirkungsgrades der Maschinen ist wichtig genug, um noch dabei zu verweilen. Der Wirkungsgrad gibt an, wie weit die Umsetzung der Energie in dem von uns gewollten Sinne vor sich ging; es kommt also auf menschliches Wollen und menschliche Zwecke an, und wir sehen die Möglichkeit, den Wirkungsgrad zu verbessern, indem wir für das, was bisher ungenutzt blieb, noch irgendeine nützliche Verwendung finden. Energie geht eben, nach dem Gesetz von der Erhaltung der Energie, nie verloren, sondern bleibt nur ungenutzt; haben wir für alles, was man auf den ersten Blick als verloren anzusehen geneigt ist, eine Verwendung gefunden, so ist der Wirkungsgrad der betreffenden Anlage 100 % geworden.

In der Ausnutzung von Energiequellen, die gewissermaßen die Abfälle irgendeines Prozesses darstellen, hat man in den letzten Jahren große Fortschritte gemacht. Wir kommen darauf noch zurück und wollen im Augenblick nur an zwei Fälle erinnern. In der Dampfmaschine werden nur 10 bis 20 % der im Dampf steckenden Wärme, in der Gasmaschine nur 30 bis 40 % der im Brennstoff steckenden chemischen Energie in mechanische Arbeit verwandelt. Der Rest bleibt in beiden Fällen als Wärme verfügbar und pufft großenteils mit dem Abdampf und den Abgasen ins Freie aus. Wir werden noch sehen, daß eine bessere Umsetzung in Arbeit nie zu erwarten ist; aber man kann die nicht umgesetzte Wärme zum Heizen und Kochen verwenden und hat durch solche Ausnutzung der „Abwärme" eine gewissermaßen kostenlose Wärmequelle von unter Umständen beträchtlicher Größe erschlossen. Der zweite Fall, an den wir erinnern wollen, ist die Ausnutzung der Hochofengase zur Speisung von Elektrizitätsnetzen. Die Eisenerzeugung im Hochofen bringt es mit sich, daß an der oberen Mündung des Ofenschachtes erhebliche Mengen von Gasen austreten, die Kohlenoxyd und Wasserstoff enthalten und daher brennbar sind. Man ließ die Gase anfangs ganz ungenutzt entweichen; das gab man freilich bald auf und verwendete sie teils zum Vorwärmen der zum Hochofen gehenden Verbrennungsluft, teils verbrannte man sie unter Dampfkesseln zum Antreiben der Gebläse, die jene Luft in den Hochofen drücken müssen, auch zum Antreiben anderer in der Nähe befindlicher maschineller Einrichtungen. Aber man konnte nicht alle Gase verwenden, weil die mit dem Hochofenbetrieb verbundenen Maschinen doch nur einen beschränkten Kraftbedarf haben, und weil man also nicht gewußt hätte, wohin mit der zuviel erzeugten Kraft. Nun kam die Entwicklung der Elektrotechnik, und seit etwa zehn Jahren verwendet man auch noch den bisher ungenutzten Teil der Hochofengase in Gasdynamos zur Erzeugung von Elektrizität und versorgt so kostenlos die Industriegebiete mit elektrischem Strom — wobei das Wort „kostenlos" immerhin mit Vorsicht zu verstehen ist, da ja nur der Brennstoff kostenlos als Abfall des Hochofenbetriebes zur Verfügung steht, während die Beschaffung und Wartung der Maschinen mit Kosten verknüpft sind und die Fortleitung der Elektrizität kostspielige Kabelanlagen erfordert, die verzinst sein wollen.

Man wird erkennen, wie in diesen beiden Fällen der Wirkungsgrad nicht der Dampfmaschine selbst, aber doch des Dampfmaschinenbetriebes, und der Wirkungsgrad nicht des Hochofens selbst, aber doch des Hochofenbetriebes verbessert worden ist. Und manche Verbesserung in diesem Sinne mag die Zeit noch bringen.

2. ENERGIEFORMEN

Nun haben wir freilich einiges vorweggenommen und als einigermaßen bekannt vorausgesetzt, auf das wir zum genaueren Verständnis des Folgenden erst noch eingehen müssen. Wir sprachen von der Einheit der Energieformen und der Umwandelbarkeit jeder derselben in jede andere als von etwas Selbstverständlichem — und das durften wir, nachdem heute fast siebzig Jahre vergangen sind, seit das Gesetz von der Erhaltung der Energie von Robert Mayer und von Hermann Helmholtz ausgesprochen wurde. Aber wenn auch die Tatsache selbst heute kaum noch der Besprechung bedarf, so wird doch eine Durchsprechung der Energieformen nicht überflüssig sein; dem Laien möge sie über manche Unklarheit hinweghelfen, den physikalisch Vorgebildeten aber in die technische Ausdrucks- und Meßweise einführen.

Die Formen der Energie, die technisch in Frage kommen, haben wir meist schon genannt; neben den mechanischen Energieformen ist es die Wärme, die Elektrizität und die chemische Energie, auf deren zweckmäßig geleiteter Wirkung mit- und gegeneinander die Wirksamkeit der Maschinen beruht. Und seitdem man die Einheitlichkeit der Naturkräfte erkannt hat, bedient man sich des Begriffes „Energie", um ihre Gesamtheit da zu bezeichnen, wo man nichts Bestimmtes darüber aussagen will, welche Form im besonderen man gerade im Auge hat.

Man hat wohl die Einheit der Energieformen zu erklären gesucht durch die Annahme, alle Energie sei letzten Endes mechanische. So sei die Wärme aus einer dem Auge wie selbst dem schärfsten Mikroskop unsichtbaren Bewegung der kleinsten Körperteilchen, der Atome und Moleküle, gegeneinander zu erklären; und ähnliche Deutungen hat man für die anderen Energieformen zu geben gesucht. Solche Hypothesen und die Frage nach ihrer Berechtigung mögen uns hier nicht kümmern. Die Einheit der Naturkräfte ist unabhängig von ihnen erwiesen durch die Tatsache, die auch maschinentechnisch von höchster Bedeutung ist, daß die Umsetzung der Naturkräfte nach bestimmten Umsetzungsverhältnissen erfolgt. Wo wir beispielsweise mechanische Arbeit aus Wärme erzeugen, da verschwindet für jede Pferdekraftstunde entstandener Arbeit eine ganz bestimmte Wärmemenge, und zwar immer die gleiche, ob wir uns nun der Dampfmaschine, der Gasmaschine oder welcher Einrichtung sonst immer zur Umsetzung bedienen. Und noch eins: verwandeln wir, etwa durch Bremsen, mechanische Arbeit in Wärme, so entsteht für jede Pferdekraftstunde verschwundener Arbeit eine bestimmte Wärmemenge, und zwar genau die gleiche, die vorher zur Erzeugung der betreffenden Arbeitsmenge verschwunden war. Das Umsetzungsverhältnis ist also nicht nur für jede Art der Umwandlung dasselbe, sondern auch für die Umwandlung im einen Sinne sowie im entgegengesetzten Sinne.

Unter den verschiedenen Formen der Energie nimmt die Wärme eine Art Ausnahme- oder Vorzugsstellung ein, die später hervortreten wird; das ist der Grund dafür, daß man die übrigen Energieformen bei Vergleichen gern in Wärmemaß umrechnet, das heißt, sie so wie Wärmemengen selbst in Wärmeeinheiten oder Kalorien angibt. Als Kalorie bezeichnet man in der Technik die Wärmemenge, die nötig ist, um 1 kg Wasser um 1 Grad zu erwärmen. Jede beliebige Wärmemenge kann man also in Kalorien angeben, indem man feststellt, um wieviel Grad sie eine bekannte Wassermenge erwärmt. Um beispielsweise ein Bad zurechtzumachen, bei dem die Wanne $^1/_4$ cbm = 250 l = 250 kg Wasser faßt, müßte man das Leitungswasser, dessen Temperatur 16° C sei, auf 32° C, also um 16° erwärmen, und würde dazu $250 \times 16 = 4000$ Kal. Wärme nötig haben. Meist werden wir mehr Wärme aufwenden müssen, weil die Erwärmung des Wassers im Badeofen mit einem Wirkungsgrade von weniger

als 100 % vor sich gehen wird; es wird Wärme zum Schornstein hinaus verloren gehen, auch wird der Badeofen schon während des Heizens Wärme durch Ausstrahlung verlieren. So wird der Wirkungsgrad vielleicht auf 80 % geschätzt werden dürfen (20 % gehen verloren), wir müssen dann $\frac{4000}{80} \times 100 = 5000$ Kal. zuführen, was meist in Form von Brennstoff, seltener in Form von Dampf oder Elektrizität geschieht. Man erkennt, wie handlich der Begriff des Wirkungsgrades für solche Rechnungen ist.

Chemische Energie besteht in der Fähigkeit zweier verschiedenartiger Stoffe, sich miteinander zu verbinden und bei der Verbindung Energie meist in Form von Wärme freiwerden zu lassen. Der bei weitem häufigste Fall ist die Verbrennung von Brennstoffen, die sich dabei mit dem Sauerstoff der Luft verbinden und die durch Erzeugung besonders großer Wärmemengen ausgezeichnet sind. Als Maß der im Brennstoff latenten chemischen Energie dient im allgemeinen und am einfachsten die bei der Verbrennung entstehende Wärmemenge: man bestimmt den Heizwert des Brennstoffes. Das pflegt durch eine kalorimetrische Messung zu geschehen. Für Leuchtgas verbrennt man eine mittels Gasuhr gemessene Menge in dem von Junkers angegebenen Kalorimeter, in dem die heißen Verbrennungsgase in gleichmäßigem Strom so gegen eine ebenfalls gemessene Wassermenge geführt werden, daß die Wärme ganz auf das Wasser übertragen wird; liest man die Temperaturerhöhung ab, die das Wasser erfährt, so läßt sich die von einem Kubikmeter Leuchtgas erzeugte Wärmemenge berechnen. Leuchtgas hat meist einen Heizwert von etwa 5000 Kal. in 1 cbm; so gebraucht man gerade 1 cbm Gas, um das vorhin erwähnte Bad mittels eines Gasbadeofens zu bereiten; das Bad wird also etwa 12 Pfennig kosten. — Bei festen Brennstoffen verbrennt man eine abgewogene Probe in komprimiertem Sauerstoff und läßt wieder die entstehende Wärme auf eine abgewogene Wassermenge übergehen, deren Temperaturerhöhung man beobachtet; wieder kann man die in 1 kg Kohle steckende Wärmemenge berechnen. So findet man für Steinkohle Heizwerte von etwa 7000 Kal., für Braunkohle solche von etwa 4500 Kal., für Koks solche von etwa 7500 Kal. — Zahlen, die natürlich je nach der Güte des Brennstoffes höher oder niedriger als diese Mittelwerte sein können. Man sieht, daß der Heizwert ein wichtiger Begriff zur Bewertung des Brennstoffes ist. Wollte man übrigens wieder die zur Bereitung jenes Bades nötige Kohlenmenge bestimmen, so dürfte man nicht übersehen, daß bei Kohlenfeuerung ein Wirkungsgrad von 80 %, wie wir ihn vorhin annahmen, unerreichbar ist. Man wird, namentlich beim Bereiten eines einzelnen Bades, wegen der unvermeidlichen Verluste beim Anmachen des Feuers, und weil zum Schluß ein Kohlenrest nutzlos verbrennt — Verluste, die bei Leuchtgas fortfallen —, vielleicht nicht über 25 % Wirkungsgrad kommen und würde dann zur Bereitung jenes Bades $\frac{4000}{25} \times 100 = 16000$ Kal. nötig haben, also $\frac{16000}{7500}$ oder rund 2 kg Kohle verbrauchen, wenn nicht mehr. Da 1 kg Kohle 3 Pfennig kostet, so kostet das Bad 6 Pfennig bei verständiger Handhabung des Ofens, also ist die Kohlenheizung trotz des schlechteren Wirkungsgrades billiger als die Gasheizung.

Elektrische Energie wird meist nach Kilowatt gemessen. Wir dürfen wohl als im allgemeinen bekannt voraussetzen, daß man beim elektrischen Strom zwischen der in Ampere zu messenden Stromstärke* und der in Volt zu messenden Spannung des

* Die Stromstärke ist die sekundlich entnommene Elektrizitätsmenge, sie ist also nicht mit der Wassermenge in Litern, sondern mit der Wasserentnahme in Litern pro Sekunde (oder Stunde) zu vergleichen.

Stromes zu unterscheiden hat; die insgesamt gelieferte Energie ist um so größer, je größer die entnommene Strommenge ist, sie ist aber auch um so größer, unter je größerer Spannung der gelieferte Strom entnommen wurde. Daher ist für die gelieferte Energie das Produkt aus Stromstärke und Spannung maßgebend, und zwar erhält man sie in Watt, wenn man die beiden Ablesungen in Ampere und Volt gemacht hatte. Das Kilowatt aber ist das Tausendfache eines Watt. So möge ein Elektromotor an ein städtisches Netz angeschlossen sein, das unter 220 Volt Spannung gehalten wird — ähnlich wie die städtische Wasserleitung etwa unter 3 Atmosphären Druck gehalten wird. Der Elektromotor entnehme 5 Ampere; dann entnimmt er eine Leistung von $220 \times 5 = 1100$ Watt oder 1,1 Kilowatt (KW). Läuft er 30 Stunden lang, so entnimmt er eine Arbeit von 33 Kilowattstunden, deren jede ungefähr mit 25 Pfennig bezahlt zu werden pflegt.

Der Unterschied zwischen der Arbeit, dem insgesamt während beliebiger Zeit Gelieferten oder Verbrauchten, und der Leistung, der in der Zeiteinheit umgesetzten Arbeitsmenge, muß wohl beachtet werden. Jede, auch die kleinste Maschine kann beliebig viel Arbeit liefern, wenn man ihr Zeit läßt; aber von ihrer in Pferdestärken oder Kilowatt zu messenden Leistung hängt es ab, wie lange Zeit sie zur Verrichtung einer bestimmten Arbeit braucht. Man macht den Unterschied wohl auch im täglichen Leben: von einem dicken Buch sagt man, es stelle eine gewaltige Arbeit dar, als sehr leistungsfähig aber sprechen wir denjenigen an, der das Buch in kurzer Zeit fertigstellt. Der weniger Leistungsfähige wird das gleiche Buch, nur in längerer Zeit, fertigstellen. Im korrekten Sprachgebrauch gilt der Unterschied beider Wörter wohl ähnlich wie in der Technik, aber im täglichen Leben drückt man sich häufig ungenau aus. Wir werden beide Begriffe streng auseinanderhalten müssen.

Da die Kalorie und die Kilowattstunde beide Arbeitseinheiten sind, so lassen sie sich eine in die andere umrechnen. Der Umrechnungsfaktor muß sich durch Versuch finden lassen. Der Versuch ist unschwer anzustellen. Man kennt die elektrischen Kochgefäße; deren Boden enthält einen elektrischen Widerstand, in dem die hineingesandte elektrische Energie in Wärme verwandelt wird; das Wasser im Gefäß wird erwärmt. Man kann nun einerseits Spannung und Stärke des elektrischen Stromes messen, der in den Widerstand hineingeht. Es mögen 5 Ampere bei 220 Volt Spannung gewesen sein, entsprechend 1,1 KW. Lassen wir den Strom 6 Minuten oder $^1/_{10}$ Stunde lang wirken, so haben wir $1{,}1 : 10 = 0{,}11$ Kilowattstunden elektrischer Energie zugeführt. Und wieviel Wärme hat sich ergeben? Wir hatten 2 kg Wasser abgewogen, dessen Temperatur hob sich von 10^{0} auf 56^{0} C, also um 46^{0}, und die erzeugte Wärmemenge ist $2 \times 46 = 92$ Kal. Also sind 0,11 Kilowattstunden gleichwertig mit 92 Kal., also ist 1 KWst. $= 92 : 0{,}11 = 860$ Kal. — Der entgegengesetzte Versuch, Wärme in Elektrizität zu verwandeln, ist nicht so glatt durchführbar, würde aber auch ergeben, daß für je 860 Kalorien, die verschwunden sind, 1 KWst. elektrischer Energie entstanden ist. Daß übrigens solche Versuche, sollen sie auch nur zu annähernd brauchbaren Werten führen, noch manche Vorsichtsmaßregel erfordern, ist klar. Nur das Prinzip des Versuchs sollte hier wie im folgenden erläutert werden.

Man könnte nun schließen wollen, daß umgekehrt aus je 860 Kalorien, die man einem Betriebe in Gestalt von Brennstoff zuführt, eine Kilowattstunde zu erzeugen sei, oder, in Leistungseinheiten ausgedrückt, daß man zur Erzeugung von 1 KW nur 860 Kalorien stündlich zuzuführen hätte. Wäre das so, so wäre der elektrische Strom billiger, als er ist. In Wahrheit geht die Umsetzung elektrischer Energie in Wärme leicht und glatt vonstatten, wie jede Glühlampe, jeder Widerstand beweist, der unter

dem Einfluß des Stromes warm wird; die umgekehrte Umsetzung geschieht aber weder so einfach noch so restlos, oder mit anderen Worten: die Umwandlung der Wärme in elektrische Energie (und auch in andere Energieformen) erfolgt mit sehr mäßigem Wirkungsgrad. Wir werden später sehen, daß das auf einer gewissen Ausnahmestellung beruht, die die Wärme vor den übrigen Energieformen — unbeschadet des Äquivalenzgesetzes — hat, und daß daher keine Aussicht besteht, die Verhältnisse durchgreifend zu bessern. Um einen Begriff davon zu geben, wie weit man die Umsetzung in dieser Richtung treiben kann, sei erwähnt, daß elektrische Kraftwerke etwa 0,7 kg Kohle für die Kilowattstunde verbrauchen. Bei einem Heizwert der Steinkohle von 7000 Kal. verbraucht man also rund 5000 Kal. an chemischer Energie, um die eine Kilowattstunde elektrischer Arbeit zu erhalten, die doch nur 860 Kal. entspricht. So werden also nur $\frac{860}{5000}$ oder 0,17 der aufgewendeten Wärme in dem gewollten Sinne verwandelt, der Wirkungsgrad ist 17 %. Das Energiegesetz leidet dabei keinen Schaden, denn die übrigen 83 % sind nicht verschwunden, sondern eben noch als Wärme vorhanden — sie können noch zum Heizen dienen.

Wir kommen endlich auf diejenige Form der Energie, die für die Maschinentechnik eigentlich die wichtigste ist, auf die *mechanische Energie* zu sprechen. Man pflegt wohl zu sagen, mechanische Arbeit werde da geleistet, wo eine Kraft nicht nur wirksam, sondern auch mit dem Erfolge wirksam ist, daß der Körper, auf den sie wirkt, sich bewegt. Die von der Kraft geleistete Arbeit ist durch das Produkt aus der Kraft und dem zurückgelegten Wege gegeben. Wenn ein Pferd beim Ziehen des Wagens eine etwa mit der Federwage zu messende Kraft von 60 kg durch das Geschirr auf den Wagen überträgt, und wenn es nun, unter dauernder Ausübung dieser Kraft, einen Weg von 100 m zurücklegt, so liefert es dabei eine Arbeit von $60 \times 100 = 6000$ Meterkilogramm (m-kg); diese Menge Energie ist in den Muskeln, vermutlich als Äquivalent chemischer Umsetzungen, freigeworden, wandert als mechanische Arbeit von dem Pferde durchs Geschirr zum Wagen, um dort durch die Reibung der Räder „vernichtet", das heißt letzten Endes in Wärme umgewandelt zu werden; nur beim Bergauffahren würde ein Teil nicht in Wärme verwandelt werden.

Als Maß der Arbeit kommt nicht nur die Kraft, sondern auch der Weg in Betracht. Die Erfahrung, daß unsere Muskeln auch durch das einfache Ausüben einer Kraft, etwa durch *Hochhalten* (nicht nur durch *Heben*) eines Gewichts ermüden, ist hier der Erkenntnis der Verhältnisse störend. Aber unser Empfinden, von physiologischen Vorgängen abhängig, täuscht uns über die physikalischen Verhältnisse: wenn wir wieder das Beispiel vom Pferd und Wagen verwenden, so ist es keine Nutzleistung des Pferdes, wenn es am Wagen zwar zieht, aber ohne ihn vorwärtszubringen, wie lange es das auch tue. Denn die gleiche Kraft können wir auch, und zwar ebenso dauernd, ja sogar beliebig lange, auf den Wagen ausüben lassen durch ein Seil, das wir entsprechend an ihm und einem festen Widerlager befestigen und mit der gleichen Kraft spannen — aber nur einmal spannen, denn dann bleibt es straff. Zur Ausübung der bloßen Kraft ist also kein lebender oder maschineller Motor nötig, das kann auch durch passende andere Anordnungen erreicht werden. Ebensowenig braucht man ein Pferd, um den Wagen einen Weg zurücklegen zu lassen, der ohne Kraftaufwand durchfahren werden kann. Der Fall ist zwar nicht ganz zu verwirklichen, aber man kann sich ihm beliebig nähern. Je leichter laufend man, durch Kugellagerungen und dergleichen, den Wagen macht, desto weniger wird ein Pferd zum Ziehen nötig sein: ein Mann, ein Kind genügt, und schließlich kann man sich wenigstens vorstellen, daß

der Wagen, einmal angestoßen, widerstandslos weiterläuft — dann braucht man keine Kraft und also auch keine Arbeit aufzuwenden.

Also weder zum Zurücklegen des Weges, wo keine Kraft zum Überwinden von Widerständen aufzuwenden ist, noch zum Aufrechterhalten einer Kraft, wo keine Bewegung erfolgt, ist dauernd ein Aufwand von Energie durch einen belebten Motor oder durch eine Maschine nötig; erst wo trotz eines Widerstandes die Bewegung dennoch erzwungen wird, da ist Energie zuzuführen, und zwar, wie die Erfahrung lehrt, entsprechend der Größe des Widerstandes und entsprechend dem zurückgelegten Wege. Die aufgewendete und in den getriebenen Körper eingeführte Energie ist also durch das Produkt aus Kraft und Weg bestimmt: die mechanische Arbeit wird, wie wir es schon taten, in Meterkilogrammen zu messen sein.

Wieder können wir unterscheiden zwischen mechanischer Arbeit und mechanischer Leistung: die Arbeit ist die Quantität der umgesetzten Energie schlechtweg, ohne Rücksicht auf die Zeit, in der sie umgesetzt wurde — die Leistung ist die in der Zeiteinheit umgesetzte Arbeit. Das Pferd also, das in unserem früheren Beispiel 6000 Meterkilogramm umsetzte, möge die 100 Meter Weges in 2 Minuten zurückgelegt haben und hat dann eine Leistung von 6000 : 2 = 3000 Meterkilogramm pro Minute geliefert; das sind aber, da die Minute 60 Sekunden hat, 3000 : 60 = 50 Meterkilogramm in der Sekunde. Es ist nicht üblich, Leistungen nach Meterkilogrammen pro Sekunde anzugeben, vielmehr bezeichnet man die Leistung von 75 m-kg pro sek als „Pferdestärke" oder „Pferdekraft" und gibt nun die Leistung irgendwelcher Maschinen, soweit mechanische Arbeit in Frage kommt, in Pferdestärken an. Unser Pferd hätte $\frac{50}{75} = \frac{2}{3}$ PS geleistet.

Die *Pferdestärke* ist also eine Leistungsangabe, so wie das Kilowatt es war, das die Leistung elektrischer Maschinen angab; das Meterkilogramm ist eine Arbeitsangabe, ebenso wie die Kalorie es für Wärmemengen ist. Man muß die gleichartigen Größen ineinander umrechnen können. Es ist 1 Kal. = 427 m-kg; diese Zahl, die man wohl als mechanisches Wärmeäquivalent bezeichnet, ist durch zahlreiche physikalische Versuche ermittelt, auf die im einzelnen einzugehen hier zu weit führen würde: so hat man ein bekanntes Gewicht in dickem Öl — welches den Widerstand bietet — um eine bekannte Strecke herabfallen lassen und die Erwärmung des Öls gemessen. Dabei haben die verschiedensten und auf ganz verschiedene Weise ausgeführte Versuche immer auf dieselbe Zahl 427 geführt, und diese Tatsache gerade ist die wichtigste Stütze für die Lehre, Wärme und Arbeit seien gleichwertig, ja, aus jenen Beobachtungen heraus hat sich die Lehre entwickelt.

Daß man die von einer Maschine gelieferte mechanische Arbeit erhalten kann, indem man ihre Leistung in Pferdestärken mit der Zeit multipliziert, während der sie geliefert worden ist, haben wir oben schon erwähnt, auch schon gesagt, daß man dadurch die Pferdekraftstunde als *Arbeitseinheit* erhält, ähnlich wie aus dem Kilowatt (einer Leistungseinheit) sich die Kilowattstunde als Arbeitseinheit ableiten ließ. Die Pferdekraftstunde muß offenbar wieder zu den anderen Arbeitseinheiten, nämlich dem Meterkilogramm, der Kalorie und der Kilowattstunde, in einem festen Verhältnis stehen — so wie der Fuß in einem festen Verhältnis zum Meter steht. Da 1 PS = 75 m-kg pro sek oder 1 PS = 75 × 3600 m-kg pro Std. ist, so ist auch 1 PS.st = 75 × 3600 = 270000 m-kg; und da die Kalorie gleichwertig ist mit 427 m-kg, so können wir auch sagen, es sei 1 PS.st = 270000 : 427 = 632 Kal. Wir haben endlich schon berechnet, daß 1 KW.st = 860 Kal. ist, also verhält sich die Kilowattstunde zur Pferde-

kraftstunde wie 860 zu 632, oder es ist 1 KW.st = 1,36 PS.st. In Leistungseinheiten ist daher natürlich auch 1 KW = 1,36 PS, oder 1 PS = 0,736 KW = 736 Watt. Das Kilowatt ist also um ziemlich genau ein Drittel größer als die Pferdestärke.

Wir haben uns mit der immerhin etwas eintönigen Berechnung der einzelnen Einheiten und der Möglichkeit ihrer Umrechnung ineinander so eingehend beschäftigt, weil nichts so gut geeignet ist, das Gefühl von der Einheit und Gleichwertigkeit der verschiedenen Energieformen zu geben, wie eben die Tatsache, daß die Umrechnung immer und ohne weiteres möglich ist, und daß man geradezu auch eine Wärmemenge in Kilowattstunden, eine mechanische Arbeit in Kalorien angeben kann — eine Tatsache, an der nichts dadurch geändert wird, daß man gern jede der Energieformen in ihrer eigenen Maßangabe mißt. Die Verhältnisse liegen etwa so wie bei den Entfernungs- oder Geschwindigkeitsangaben zu Lande und zu Wasser: hier macht man sie in Kilometern, dort in Seemeilen, aber nicht, weil ein durchgreifender Unterschied zwischen beiden Arten von Entfernungen bestände, sondern nur weil es das Herkommen so will, und weil sich, der geschichtlichen Entwickelung des Meßwesens gemäß, verschiedene Einheiten für die gleiche Sache unter verschiedenen Verhältnissen eingebürgert haben. Wir wollen, bevor wir zu interessanteren Gegenständen übergehen, in einer Zusammenstellung die Zahlenangaben festhalten, die wir eben berechnet haben. Die kursiv gedruckten Angaben beziehen sich auf Leistungsangaben.

Energieform	mechanisch	Wärme	elektrisch
mechanisch	1 PS.st = 270000 m-kg *1 PS = 75 m-kg/sek*	1 m-kg = $\frac{1}{427}$ Kal.	1 PS.st = 0,736 KW.st *1 PS = 0,736 KW*
Wärme	1 Kal. = 427 m-kg	—	1 Kal. = 4,2 Watt-sek.
elektrisch	1 KW.st = 1,36 PS.st *1 KW = 1,36 PS*	1 KW.st = 860 Kal. *1 KW = 860 Kal/st*	—

3. DIE MECHANISCHE ENERGIE IN IHRER MANNIGFALTIGKEIT

Wir wollen nun zunächst den mannigfachen Wandlungen nachgehen, denen die mechanische Energie selbst unterworfen sein kann, auch solange keine anderen Energieformen in Frage kommen. Während der Zusammenhang der anderen Energieformen erst in den vierziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts durch Arbeiten von Robert Mayer, Joule und Helmholtz sichergestellt wurde, ist man über die Wandelbarkeit der mechanischen Energie schon viel länger orientiert. Schon Männer wie Newton und Leibniz (um 1700) erkannten die Zusammenhänge, die wir nun in einer spezifisch technischen Form darlegen wollen.

KRAFT-WEG-DIAGRAMM; EISENBAHNZUG. Mechanische Arbeit wird da geleistet, wo eine Kraft an einen Körper angreift, der in Bewegung ist, und zwar in ihrem Sinne in Bewegung ist; die Quantität der Arbeit ist durch das Produkt aus der Kraft und dem zurückgelegten Weg gemessen. Das ergibt eine sehr bequeme Art, die aufgewendete Arbeit insbesondere dann darzustellen, wenn die Kraft wechselt: man kann in einem Schaubild die Kraft als abhängig vom Weg auftragen und hat dann als Wert der aufgewendeten Arbeit die Fläche unter der Kraftkurve in Rechnung zu setzen. Wegen der großen Bedeutung, die diese Art der Darstellung für die Untersuchung von Maschinen mittels des Indikatordiagramms hat, werden wir etwas näher auf sie eingehen.

Ein Eisenbahnzug fährt von einer Station zu einer anderen, die 6 km von der ersten entfernt liegt. Das Längenprofil der Strecke ist in Abbildung 1 gegeben. Von km 0 bis km 2 geht die Strecke wagerecht, von km 2 bis km 3 senkt sie sich, um ein Flußtal zu kreuzen, von km 3 bis 4 läuft sie wieder wagerecht, um von km 4 bis 5 auf der anderen Seite des Flußtals anzusteigen, bei km 5 die frühere Höhe zu erreichen und von km 5 bis 6 wagerecht zu verlaufen. Es bedarf nur der Erwähnung, daß die Neigungen in Abbildung 1 stark übertrieben sind, weil nämlich, wie immer in solchen Streckenprofilen, die Höhenabmessungen in viel größerem Maßstab gezeichnet sind als die Längenabmessungen, etwa im zehnfachen Maßstab. Die Strecke soll ganz ohne Kurven verlaufen.

Auf dieser Strecke fährt der Zug, und zwar ist dem Führer vorgeschrieben, eine „Grundgeschwindigkeit" von 60 km in der Stunde innezuhalten. Die Geschwindigkeit, die demnach der Zug an jeder Stelle seines Weges haben wird, ist in Abbild. 2 dargestellt. Nach dem Verlassen der Ausgangsstation kommt der Zug erst allmählich auf seine Geschwindigkeit. Bei km 1 ist die volle Geschwindigkeit erreicht und wird nun innegehalten, bis bei km 5 der Dampf abgestellt wird, worauf der Zug, sei es von selbst, sei es durch Bremsen, richtig bei km 6 zum Stehen kommt. Die Geschwindigkeit beginnt und endet mit 0, und ist von km 1 bis km 5 dauernd 60 km stündlich.

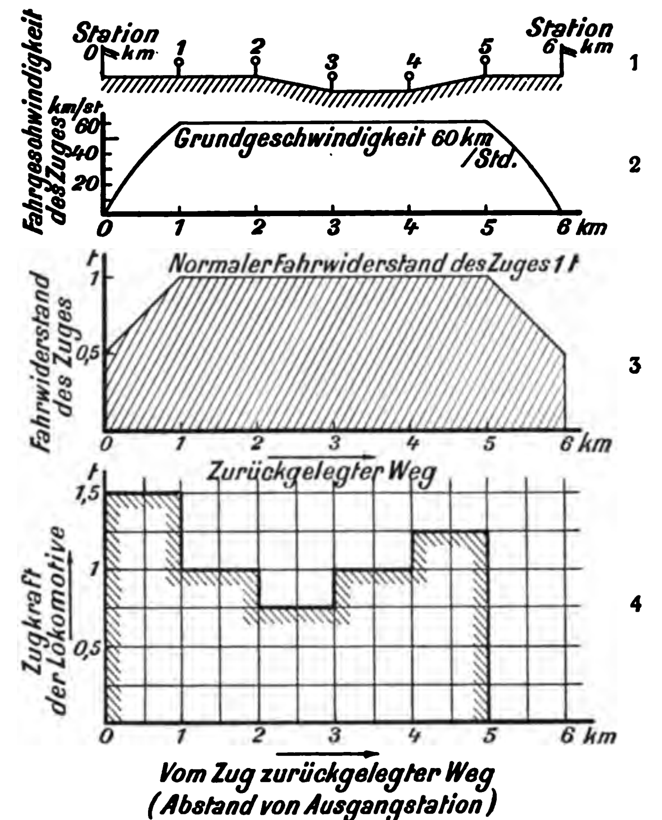


Abbildung 1 bis 4. Arbeitsaufwand und Arbeitsverbrauch bei einem fahrenden Eisenbahnzug.
1 Längenprofil der Strecke — 2 Fahrgeschwindigkeiten des Zuges — 3 Zugwiderstände — 4 Von der Lokomotive ausgeübte Zugkräfte.

Beim Fahren erleidet nun der Zug einen gewissen Fahrwiderstand, der herrührt von der Reibung der Räder auf den Schienen, der Radachse in ihren Lagern, endlich von dem Luftwiderstand. Dieser Fahrwiderstand hängt von der Geschwindigkeit des Zuges ab und wird um so größer sein, je schneller der Zug fährt. Von seiner Größe können wir uns durch den Versuch überzeugen, wenn wir zwischen die Lokomotive und den ersten Wagen eine Federwage einschalten, die an einem durch Dehnung einer Feder betätigten Zeiger die Kraft anzeigt, mit der die Lokomotive den Zug vorwärtszieht. An dieser Federwage beobachten wir die jeweils von der Maschine ausgeübte Zugkraft. Wenn wir zum Beispiel zwischen km 1 und 2 die Federwage ablesen, so beobachten wir eine Zugkraft von 1000 kg = 1 t, und da an dieser Stelle der Zug nicht mehr anfährt, sondern sich gleichmäßig fortbewegt (siehe Abbildung 2), da er auch weder aufwärts- noch abwärtsläuft (siehe Abbildung 1), so muß offenbar der Fahrwiderstand des Zuges gerade so groß sein wie die Zugkraft der Lokomotive.

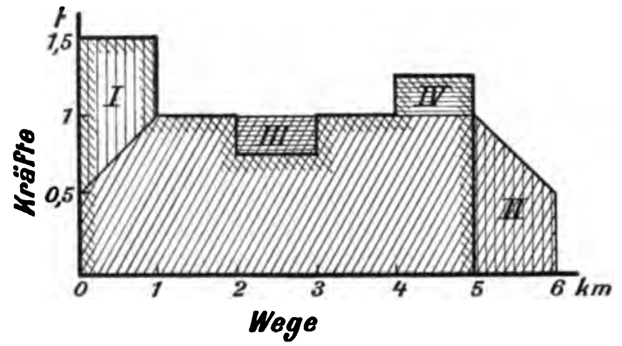
Wir hätten also festgestellt, daß bei 60 km Geschwindigkeit der Fahrwiderstand des Zuges 1 t beträgt. Dieser Reibungswiderstand (nicht aber die an der Federwage abgelesene Zugkraft) wird unverändert bleiben, auch wenn die Strecke geneigt ist, solange nur die Geschwindigkeit unverändert bleibt; er wird den Betrag von 1 t haben, von km 1 bis km 5 (Abbildung 3). Er wird kleiner sein, wenn vor km 1 die Geschwindigkeit noch nicht, oder hinter km 5, wo die Geschwindigkeit nicht mehr jenen Wert hat. Lassen wir den Zug sehr langsam fahren, so sei die Zugkraft nur 0,5 t — denn natürlich wird die Zugkraft, auch für noch so langsames Fahren, nicht ganz Null werden. Wie sie ansteigt und abfällt, ließe sich auch durch Versuche ermitteln, indem man den Zug mit verschiedener Geschwindigkeit gleichmäßig fahren läßt. Man möge dafür den Verlauf gefunden haben, der in Abbildung 3 dargestellt ist. Diese Figur stellt dann dar, wieviel Zugkraft an jeder Stelle der Strecke zur Überwindung der Reibungswiderstände nötig war.

Nun beobachten wir aber während der ganzen Fahrt den Lokomotivführer und notieren uns auch die wirklich beobachtete, mittels jener Federwage gemessene Zugkraft der Lokomotive. Die Ergebnisse unserer Beobachtung sind in Abbildung 4 wiedergegeben. Anfangs gibt der Führer Volldampf, um den Zug recht schnell in Bewegung zu bringen. Wir beobachten dabei eine Zugkraft von 1,5 t, die gleichmäßig bis zum Stein 1 km ausgeübt wird. Diese Kraft von 1,5 t sehen wir in Abbildung 4 über dem ersten Kilometer angetragen. Da der Zug bei km 1 gerade die vorgeschriebene Geschwindigkeit von 60 km stündlich erreicht hat, mäßigt der Führer durch Drosseln des Dampfes die Zugkraft der Maschine, um eine Überschreitung der Geschwindigkeit zu vermeiden. Von km 1 bis km 2 beobachten wir daher jene Zugkraft von 1 t, die gerade ausreicht, um die Widerstände bei normaler Fahrgeschwindigkeit zu decken. Bei km 2 stellt der Führer den Dampf noch etwas weiter ab, um eine Überschreitung der Höchstgeschwindigkeit auf der fallenden Strecke zu vermeiden: von km 2 bis km 3 zeigt Abbildung 4 nur 0,75 t Zugkraft. Von km 3 bis 4 geht die Strecke horizontal, dem entspricht wieder 1 t Zugkraft. Von km 4 bis 5 steigt die Strecke, die Zugkraft wird auf 1,25 t gesteigert. Bei km 5 wird der Dampf abgestellt, der Zug beginnt, ohne von der Maschine gezogen zu werden, auszulaufen, das heißt, Maschine und Zug laufen, ohne Kraft aufeinander auszuüben, hintereinander her, die Federwage zeigt — in Wirklichkeit vielleicht nicht immer ganz genau — eine Zugkraft 0 an, was auch Abbildung 4 angibt.

Wir sehen also, daß die Zugkraft der Lokomotive nicht immer mit dem Fahrwiderstande des Zuges übereinstimmt, daß sie nämlich davon abweicht, wenn der Zug sich beschleunigt oder verzögert, aber auch, wenn er auf fallender oder auf steigender Strecke läuft. Um die Unterschiede deutlich hervortreten zu lassen, sind die Abbildung 3, deren Fläche rechts schraffiert ist, und die Abbildung 4, deren Umrisse randschraffiert sind, in Abbildung 5 aufeinandergelegt. Bevor wir aber Abbildung 5, in der wir die rechts schraffierte und die randschraffierte Fläche leicht wiedererkennen, genauer betrachten, müssen wir uns klar darüber werden, was für eine Bedeutung der Flächeninhalt der Figuren hat.

Diese Flächen stellen nämlich Arbeit dar, und zwar deshalb, weil senkrecht Kräfte aufgetragen sind, wagerecht aber die Wege, die der Angriffspunkt der Kraft — der Zughaken der Lokomotive — zurückgelegt hat. Der Inhalt einer Fläche ist gegeben durch ihre wagerechte und ihre senkrechte Erstreckung, und zwar durch das Produkt von Länge und Höhe. Die Arbeit aber ist gegeben durch das Produkt aus Kraft und Weg.

Wenn also von km 0 bis km 1 die Zugkraft der Lokomotive 1500 kg, der zurückgelegte Weg 1 km = 1000 m beträgt, so ist der Arbeitsaufwand der Lokomotive beim Durchfahren dieser Strecke mit 1500 × 1000 = 1500000 m-kg anzusetzen. Abbild. 4 ist auf kariertem Papier entworfen, und da die Seite eines Karos einesteils 0,5 km, andernteils 0,25 t bedeutet, so stellt jedes Karo 500 m × 250 kg = 125000 m-kg Arbeit dar. Wir zählen in Abbildung 4 auf dem ersten Kilometer 12 Karos, also hat die Lokomotive auf dem ersten Kilometer 12 × 125000 = 1500000 m-kg oder 1500 Metertonnen Arbeit an den Zug übertragen. Auf dem zweiten Kilometer zählen wir 8 Karos, das sind 1000000 m-kg. Insgesamt sind 44 Karos schraffiert, so hat die Maschine 5500000 m-kg Arbeit nutzbar geleistet.



Abbild. 5. Kraft-Weg-Diagramm für den Eisenbahnzug.

Diese Art der Ermittelung von Arbeitsmengen aus Diagrammen, in denen man die Kraft in ihrer Abhängigkeit vom Weg aufzeichnet, ist sehr wichtig, und wir werden noch oft von ihr Gebrauch machen. Es ist nicht nötig, daß die Kraft immer von Kilometer zu Kilometer unverändert bleibt. Sie kann beliebig wechseln und schwanken, was wir ja an der Federwage erkennen würden, so daß dann an Stelle der gebrochenen Linie Abbildung 4 eine krumme Linie tritt. Auch dann ist die eingeschlossene Fläche ein Maß für die gelieferte Arbeit, und in diesem Falle ist das Ausmessen der Flächengröße fast das einzige Mittel — jedenfalls das bequemste —, um die gelieferte Arbeit zu finden. Ist das Auszählen der Quadrate zu unbequem, so bedient man sich zum Ermitteln der Diagrammflächen eines besonderen Instruments, des Planimeters (siehe später, Abbildung 36).

Die Gesamtarbeit der Lokomotive auf dem ganzen Wege ist 5500000 m-kg. Diese Arbeit kann nicht verschwunden sein — wo ist sie geblieben? Verfolgen wir einmal sorgsam, was aus den einzelnen Teilen der von der Lokomotive gemäß Abbildung 4 an den Zug übertragenen Arbeit geworden ist. Dazu eben soll uns Abbildung 5 dienen, in der wir die Kurve der Fahrwiderstände Abbildung 3 über die Kurve der von der Lokomotive geleisteten Zugkraft Abbildung 4 gelegt hatten.

Nun sehen wir, daß von km 1 bis km 2 und von km 3 bis 4, wo nämlich der Zug mit gleichmäßiger Geschwindigkeit durch die Ebene fährt, die Zugkraft der Lokomotive gleich dem Fahrwiderstand des Zuges ist. Die Lokomotive hat dann nichts zu tun, als gerade den Fahrwiderstand zu überwinden.

Sonst aber ergeben sich Unterschiede. Wie sind diese zu erklären?

Beim Anfahren hat die Maschine nicht nur die Bewegungswiderstände zu decken, sondern muß eine weitere Kraft ausüben und daher entsprechend der senkrecht schraffierten Fläche I weitere Arbeit leisten, um dem Zuge seine Geschwindigkeit zu erteilen. Die Beobachtung, daß immer zum Ingangsetzen schwerer Massen Energie aufzuwenden ist, die gewissermaßen nachher in der bewegten Masse drinsteckt, hat dazu geführt, zu sagen: eine bewegte Masse enthalte kinetische Energie (Bewegungsenergie) in einem Betrage, der offenbar von der Größe der bewegten Masse und auch von ihrer Geschwindigkeit abhängt. Man bezeichnete die kinetische Energie früher wohl auch als lebendige Kraft; dieser Ausdruck ist mit Recht abgekommen; wir werden bald

sehen, daß der bewegte Körper nicht eine bestimmte Kraft auszuüben imstande ist, vielmehr je nach Umständen sehr verschiedene Kräfte ausüben kann; aber unter allen Umständen kann er eine bestimmte Menge Energie hergeben, wenn man ihn anhält — die gleiche Menge, die er beim Beschleunigen aufgenommen hatte.

Am Anfange mußte also die Lokomotive mehr Zugkraft ausüben und mehr Arbeit leisten, als dem Fahrwiderstand entsprach. Der Mehraufwand ist verbraucht worden, um den Zug auf die vorgeschriebene Geschwindigkeit zu bringen. Er ist nicht verloren, ist vielmehr in voller Größe verfügbar und ermöglicht es uns, den Dampf schon bei km 5 abzustellen und doch noch bis km 6 zu fahren. Die am Anfange mehr aufgewendete Energie ist also nur aufgespeichert und kommt wieder zum Vorschein; deshalb eben ist die kinetische Energie eine Form der Energie. Die ebenfalls senkrecht schraffierte Fläche II ist es, die wir am Ende des Weges wiedererhalten, indem die anfangs als Fläche I zur Beschleunigung aufgewendete Energie nun den Fahrwiderstand bis zum Stillstand des Zuges — bis seine kinetische Energie aufgezehrt ist — überwindet. Fläche I und II sind einander gleich, wenn man nicht etwa einen Teil der kinetischen Energie durch Bremsen, d. h. also durch künstliches Verstärken des Fahrwiderstandes, vernichtete; sie müssen einander gleich sein, soll das Gesetz von der Erhaltung der Energie nicht umgestoßen werden, und die Tatsache, daß alle derartigen Proben stets stimmen, ist die Grundlage für die Aufstellung jenes Gesetzes, insbesondere dafür, daß man mit Recht dem Produkt aus Kraft und Weg unter dem Namen der mechanischen Arbeit eine besondere Bedeutung beilegt.

Auch sonst herrscht nicht immer Gleichheit zwischen dem Fahrwiderstand des Zuges und der Zugkraft der Lokomotive. Nämlich von km 2 bis 3 konnte die Zugkraft ermäßigt werden. Das Herabsinken des Zuggewichtes bei abfallender Strecke (Abbildung 1) lieferte jetzt die fehlende Arbeit zur Überwindung der Fahrwiderstände. Und von km 4 bis 5 mußte die Zugkraft gesteigert werden, da noch die dem Heben des Zuges entsprechende Arbeit zu leisten ist. Beide Arbeiten sind durch wagerechte Schraffur der betreffenden Flächen III und IV gekennzeichnet. Die beim Sinken freigewordene, dampfsparende Arbeit wird beim Heben wieder gebunden — in genau gleicher Größe, weil angenommen war, die beiden Endstationen lägen gleich hoch, sonst würde sie erst bei der Rückfahrt des Zuges wiedergewonnen werden.

Da Fläche I und II, Fläche III und IV je einander gleich sind, so ist also auch die in Abbildung 4 dargestellte randschraffierte Fläche der von der Lokomotive aufgewendeten Arbeit gleich der in Abbildung 3 schraffierten Fläche der zur Überwindung der Fahrwiderstände nötigen Arbeit: die ganze Arbeit der Lokomotive setzt sich in Reibung und damit in Wärme um, sofern man die ganze Fahrt betrachtet, an deren Ende der Zug keine kinetische Energie mehr aufgespeichert enthält, und an deren Ende er sich auch, wegen der gleichen Höhenlage der Stationen, weder gehoben noch gesenkt hat.

Der Inhalt einer mit der Geschwindigkeit w Meter in der Sekunde sich bewegenden Masse vom Gewicht G kg ergibt sich bekanntlich aus der Betrachtung, daß der Körper, der Kraft seiner eigenen Schwere von G kg folgend und um H Meter herabfallend, die Arbeit G·H Meterkilogramm frei werden läßt. Für die Geschwindigkeit w aber gilt die Beziehung $w^2 = 2gH$, wenn $g = 9{,}81$ die Beschleunigung der Erdschwere ist. Das heißt also, der mit der Geschwindigkeit w laufende Körper könnte senkrecht steigend auf die Höhe $H = \frac{w^2}{2g}$ kommen, kann also eine Arbeit $G \cdot H = G \cdot \frac{w^2}{2g}$ entgegen der Schwerkraft leisten. Dies ist also sein Inhalt an Energie in kinetischer Form. Man bezeichnet auch wohl $\frac{G}{g} = \frac{G}{9{,}81}$ als die Masse m des Körpers — im Gegensatz zu seinem Gewicht G — und sagt dann, sein Inhalt an kinetischer Energie sei $\frac{1}{2}\,m\,w^2$.

D-ZUG UND GESCHOSZ. Ein interessanter Vergleich zur Erläuterung der Bedeutung der Beschleunigungsenergie und auch des früher besprochenen Unterschiedes zwischen Arbeits- und Leistungswerten läßt sich anstellen zwischen dem Anfahren eines D-Zuges und dem Abschießen eines Geschosses. Man erhält dabei, mit Durchschnittswerten rechnend, folgende Ergebnisse.

Ein moderner D-Zug wiegt etwa 450 t und fährt mit einer Geschwindigkeit von 25 m in der Sekunde (90 km/st). Er enthält demnach im fahrenden Zustande eine kinetische Energie, die durch den Ausdruck $\frac{1}{2} \times m \times w^2$ gegeben ist. Da die Masse m gleich dem Gewicht G geteilt durch die Schwerebeschleunigung von 9,81 m pro sek ist, so enthält er an kinetischer Energie $\frac{G}{9,81} \times \frac{w^2}{2} = \frac{450\,000}{9,81} \times \frac{25^2}{2} = 14400000$ m-kg; oder, da man bei diesen großen Arbeitsmengen lieber mit einer größeren Einheit rechnet, so kann man auch 14400 m-t als kinetische Energie des fahrenden Zuges angeben. Es ist dies diejenige Arbeit, die dem Zuge beim Anfahren durch die Lokomotive erteilt werden muß über die Widerstände der Fahrbahn hinaus, von denen wir bei dieser Rechnung absehen wollen, um nur die reinen Beschleunigungsverhältnisse zu haben. Das Anfahren eines D-Zuges dauert etwa 5 min = 300 sek, und wenn wir die sicher nicht zutreffende, aber einfache Annahme setzen, daß während der Anfahrzeit der Zug durchschnittlich seine halbe Höchstgeschwindigkeit hat, also mit 12,5 m/sek fährt, so würde er $300 \times 12,5 = 3700$ m Weges brauchen, bis er seine volle Geschwindigkeit angenommen hat. Diese Zahlen entsprechen etwa der Erfahrung. Um nun bei 3700 m Anfahrstrecke eine Arbeit von 14400000 m-kg dem Zuge zuzuführen, ist eine Zugkraft der Lokomotive von $\frac{14400000}{3700} = 4000$ kg erforderlich, und zwar durchschnittlich während der Anfahrzeit: sie wird nämlich zunächst größer sein und mit wachsender Geschwindigkeit abnehmen, sich also um 4000 kg herum bewegen. Die durchschnittliche Leistung der Lokomotive während der Anfahrzeit ergibt sich daraus, daß 14400000 m-kg Arbeit in 300 sek geleistet worden sind, woraus sich, wenn wir gleich durch Dividieren mit 75 auf Pferdestärken übergehen, eine durchschnittliche Anfahrleistung von $\frac{14400000}{300 \times 75} = 670$ PS ergibt. Auch dies ist nur ein Durchschnittswert, denn die Leistung steigt ja mit der Geschwindigkeit, sie wird im ersten Augenblick Null sein, weil die Geschwindigkeit Null ist, dafür zum Schluß etwa das Doppelte des erreichten Wertes betragen. In der Tat können D-Zug-Maschinen in voller Fahrt bis zu 1200 PS Leistung entwickeln.

Mit einem solchen D-Zuge soll nun das Verhalten eines Geschosses im Lauf der Kanone verglichen werden, und zwar wollen wir dabei an eins der größten Kruppschen Geschütze denken, das die Bezeichnung L 40 trägt, ein Kaliber von 30,5 cm, eine Rohrlänge von 50 Kalibern = 15 m hat, und für das bei Verwendung eines Geschosses von 440 kg Gewicht eine Geschwindigkeit des Geschosses beim Verlassen der Mündung von 865 m/sek angegeben wird. Es läßt sich leicht finden, daß das Geschoß an kinetischer Energie beim Verlassen der Mündung $\frac{440}{9,81} \times \frac{865^2}{2} = 17000000$ m-kg = 17000 m-t enthält. Man sieht also, das Geschoß hat einen etwas größeren Inhalt an kinetischer Energie als der D-Zug: es ist zwar nur ein Tausendstel so schwer wie der Zug, wird aber auf mehr als das Dreißigfache der Geschwindigkeit gebracht, und da das Quadrat der Geschwindigkeit maßgebend ist, so kommt man auf einen so hohen Wert der kinetischen Energie. Diese kinetische Energie wird dem Geschoß aber

in viel kürzerer Zeit erteilt, denn wenn wir wieder annehmen, es habe während der Zeit, wo es im Lauf beschleunigt wurde, durchschnittlich seine halbe Endgeschwindigkeit gehabt, bewegte sich also im Lauf durchschnittlich mit 430 m-sek, so braucht es zum Zurücklegen der 15 m Beschleunigungsweg im Lauf eine Zeit von $^{15}/_{430}$ oder fast genau $^{1}/_{30}$ sek. Diesmal wird also die annähernd gleiche Beschleunigungsarbeit von 17000 m-t in nur $^{1}/_{30}$ sek Zeit geleistet, und daher wird die Leistung der Kanone unverhältnismäßig größer sein als die der D-Zug-Maschine: sie berechnet sich zu $\frac{17000000}{^{1}/_{30} \times 75} = 7000000$ PS. Es sind das wohl die größten Leistungen, die durch menschliche Mittel freilich nur auf kurze Zeit konzentriert erzeugt werden können. Übrigens berechnet sich noch die durchschnittliche Kraft, mit der das Geschoß im Lauf vorwärtsgetrieben wird, wobei wir auch hier wieder von den Reibungswiderständen absehen, zu $\frac{17000000}{15} = 1100000$ kg. Es sind also auch gewaltige Kräfte erforderlich, um dem Geschoß auf dem kurzen Beschleunigungswege die gewaltige Menge kinetischer Energie zuzuführen. Da bei 30,5 cm Durchmesser des Geschosses die Kraft von 1100000 sich auf 730 qcm Fläche verteilt, so ist also eine Spannung von $\frac{1100000}{730} = 1500$ kg auf jedes Quadratzentimeter des Verbrennungsraumes nötig, oder, da wir die Spannung von 1 kg pro qcm als eine Atmosphäre zu bezeichnen pflegen, so herrscht im Verbrennungsraum durchschnittlich eine Spannung von 1500 Atm.

Aus der Gleichheit des Energieinhalts der bewegten Massen folgt, daß D-Zug und Geschoß (von Wirkung einer Sprengladung natürlich abgesehen) insgesamt etwa die gleichen zerstörenden Wirkungen haben, die sich allerdings beim Geschoß auf einen viel engeren Raum konzentrieren, als es beim D-Zug mit seiner breiten Angriffsfläche der Fall ist. Überdies richten sich die Zerstörungen eines auf ein Hindernis auffahrenden D-Zuges in höherem Maße nach innen, und die äußeren Zerstörungen werden entsprechend geringer, weil für beides zusammen die gleiche Energie verfügbar ist.

Der Vergleich der beiden drastisch verschiedenen Fälle möge in folgender Tabelle zusammengefaßt werden:

	Eisenbahnzug	Geschoß	
Ein Gewicht von	450000	440	kg
wird gebracht auf die Endgeschwindigkeit . . .	25	865	m pro sek
Dem entspricht die etwa gleiche kinetische Energie (Arbeit) von	14400000	17000000	m-kg,
die zugeführt wird während des Anlaufweges von	3600	15	m
also mit einer (durchschnittlichen) Kraft von . .	4000	1100000	kg
Der Beschleunigungsvorgang dauert etwa . . .	300	$^{1}/_{30}$	sek
das entspricht also einem (mittleren) Leistungsaufwand von	670	7000000	PS.

AUSLAUFWEG BEWEGTER MASSEN. Das an den Abbildungen 1 bis 5 dargestellte Beispiel eines Eisenbahnzuges, der die Station verläßt und auf der nächsten wieder bremst, wäre komplizierter geworden, wenn wir nicht gerade angenommen hätten, daß die Auslaufstrecke von km 5 bis km 6 genau so lang und die bei ihr wirkenden Widerstände genau so groß seien, wie sie es bei der Anlaufstrecke von km 0 bis km 1 gewesen waren. Will man den Zug auf kürzerer Strecke zum Halten bringen, so muß gleichwohl die in ihm aufgespeicherte kinetische Energie vernichtet

werden, d. h. es muß die gesamte durch die Widerstände verzehrte Arbeit einen Wert annehmen, der durch eine Fläche von der Größe wie Fläche I gegeben ist. Wird der Weg kürzer, so müssen die widerstehenden Kräfte größer sein, damit das Produkt aus Kraft und Weg den gleichen Wert erreicht. Wir können also den Auslaufweg verkürzen durch Bremsen des Zuges, durch künstliches Vergrößern des Fahrwiderstandes.

Diese Folgerung erscheint banal, aber der in ihr steckende Gedanke ist doch nicht ganz so einfach in seinen Folgerungen zu übersehen, wie es zunächst den Anschein hat. Es folgt nämlich daraus, daß in Fällen, wo man den Auslaufweg eines bewegten Körpers sehr stark verkürzt, entsprechend sehr große Kräfte freiwerden müssen, Kräfte von einer Größe, wie man sie auf andere Weise nicht leicht erzielen kann.

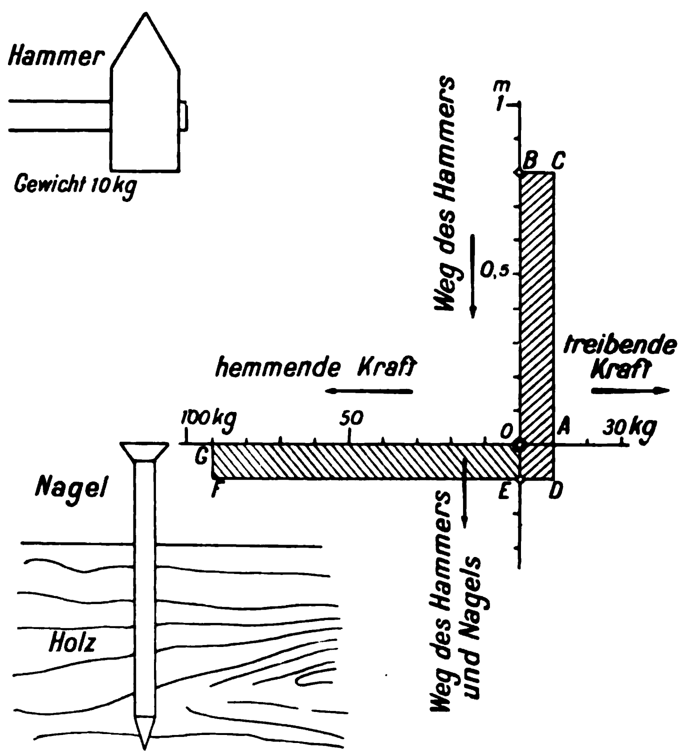


Abbildung 6. Kraft-Weg-Diagramm für einen Hammer.

Bei einem Eisenbahnunglück pflegt der in Fahrt befindliche Zug auf irgendeinen ruhenden Gegenstand aufzufahren und dabei auf einem kurzen Weg zum Stehen gebracht zu werden. Dabei müssen große Kräfte freiwerden, die sich ja auch in der Tat durch Zerstörungen aller Art bemerkbar machen. Die Lokomotive würde, auch wenn man sie mit voller Kraft, aber im Stillstande, gegen den Widerstand arbeiten ließe, gar nicht imstande sein, Zerstörungen zu machen. Die von der Lokomotive in allmählichem Anfahren allmählich geleistete und im Zug aufgespeicherte Arbeit ist imstande, das zu tun, was die Lokomotive sonst nicht könnte.

Ein anderes Beispiel ist der Hammer, sei es der handbewegte, sei es der Dampfhammer. In Abbildung 6 denken wir uns einen Hammer senkrecht herunterfallend unter dem Einfluß der Schwerkraft, der Hammer legt also einen Weg zurück von dem Punkte B bis zum Punkte O, er nimmt dabei eine Geschwindigkeit an, deren Berechnung uns nicht zu interessieren braucht, so einfach sie auch dem physikalischen Gesetz nach wäre. Aber unabhängig davon können wir sagen, wie groß die in der Höhenlage O, wo der Hammer auf den Nagel trifft, in ihm aufgespeicherte Energie ist. Der Hammer mag etwa 10 kg schwer sein, entsprechend der Strecke OA, die wagerecht in dem Schaubilde angetragen ist. Dann wird die Schwerkraft der Erde, die in diesem Falle die Rolle der beschleunigenden Lokomotive spielt, auf den Hammer dauernd, während des ganzen Weges gleichmäßig 10 kg, Kraft ausüben, und wenn der Hammer über einen Weg BO hin, über 0,8 m Höhe hin, dieser Kraft folgt, so wird eine Arbeit von 10 kg $\times$ 0,8 m = 8 m-kg frei sein, dargestellt durch die Fläche

OACB, die die im Hammer aufgespeicherte kinetische Energie darstellt. Denn Widerstände, entsprechend dem Fahrwiderstand beim Eisenbahnzug, erfuhr der fallende Hammer nicht.

Wie groß nun die Kräfte sind, die der Hammer auf den Nagel ausübt, hängt nicht von ihm ab, sondern vom Nagel und von der Holzart. Der Nagel erfahre durch Reibung im Holz einen Widerstand von 90 kg. Dann würde vom Punkte O an abwärts eine hemmende und daher negativ (nach links) anzutragende Kraft gleich der Strecke OG von 90 kg wirken. Der Hammer kommt mit dem Nagel in E zur Ruhe, der Nagel dringt also das Stück OE ins Holz ein, wenn wir den Punkt E so aufsuchen, daß die durch Reibung aufgezehrte Arbeit, Fläche OEFG, ebenso groß ist wie die von der Schwerkraft beim Niedergehen des Hammers geleistete Arbeit, Fläche BCDE. Die Kraft von 90 kg also ist es, die den Weg bestimmt, den der Nagel und mit ihm der Hammer noch macht. Man wird aber leicht erkennen, und es ist ja auch aus der Anschauung klar, daß der Bremsweg — der Weg also, den der Nagel in das widerstehende Material hineinmacht — um so größer wird, je kleiner der Widerstand ist, den der Nagel erfährt: in Fichtenholz dringt, bei bestimmtem Hammergewicht und bestimmter Fallhöhe, der Nagel tiefer ein als in Eichenholz.

Beim Dampfhammer (Abbildung 7) liegen die Verhältnisse ganz ähnlich, nur wird der Hammer nicht durch die Muskelkraft, sondern durch die Kraft des unter einen Kolben tretenden Dampfes gehoben; außerdem unterstützt man nach Bedarf die Schwerkraft durch die Kraft des über den Kolben geleiteten Dampfes, um dem „Bären" trotz mäßiger Fallhöhe doch genügende Endgeschwindigkeit zu erteilen.

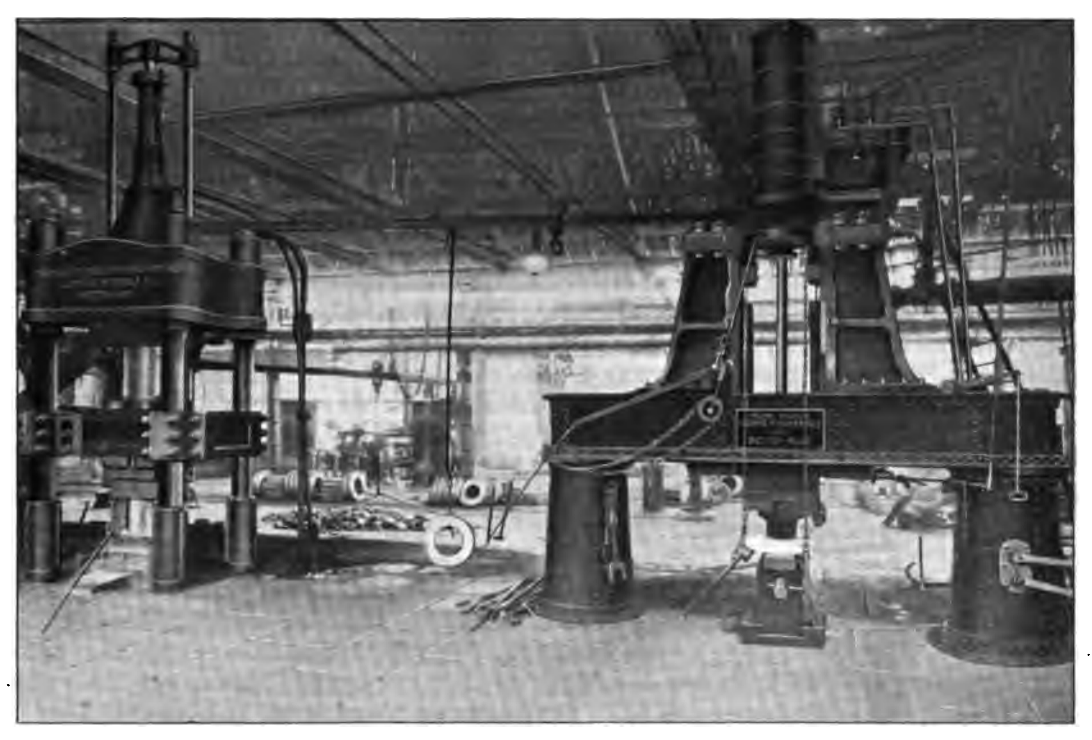


Abbildung 7. Druckwasser-Schmiedepresse (links) und Dampfhammer (rechts) zum Bearbeiten großer Schmiedestücke. Deutsche Maschinenfabrik, Duisburg.

Ähnlichem Zwecke dient die Ramme. Die Arbeiter heben, wenn wir an eine sogenannte Kunstramme denken, in mühsamer, mehrere Minuten dauernder Arbeit an einer Kurbel drehend den Bären auf eine gewisse Höhe oberhalb des Pfahles, auf den er niedersausen soll. Sie führen ihm daher Energie zu — ein Teil der aufgewandten Muskelenergie wird allerdings im Getriebe der Winde verbraucht; die dem Bären zugeführte Energie ist potentielle, sie ist durch die Höhenlage des Bären gegeben. In Abbildung 8 findet die Energiezufuhr durch einen Elektromotor statt; in die von ihm bewegte Kette wird der Bär eingeklinkt und dann durch Ziehen an einer Auslösung freigelassen. Während der Bär niederfällt, verwandelt sich die potentielle in kinetische Energie; wenn der Bär auf den zu rammenden Pfahl trifft, ist sie in rein kinetischer Form im Bären enthalten. Der bewegte Bär ist dann wie der Hammer befähigt, sehr große Kräfte auf den Rammpfahl auszuüben, Kräfte, die das Vielfache seines Gewichts ausmachen und daher den Pfahl entgegen dem sehr großen Widerstande vorwärtstreiben. Läßt man den Bären von 500 kg Gewicht aus 5 m Höhe fallen, so hat er beim Auftreffen auf den Pfahl 2500 m-kg an kinetischer Energie aufgespeichert. Ist der Widerstand, den der Rammpfahl erfährt, beim Eindringen in das Erdreich 5000 kg, so müßte der Pfahl um $\frac{2500}{50000} = {}^{1}/_{20}$ m $= 5$ cm eindringen. Er bewegt sich etwas weniger, weil die Elastizität des Pfahles Arbeit verbraucht.



Abbild. 8. Ramme mit elektrischem Antrieb. Menck & Hambrock, Altona.

Man erkennt, daß die Aufspeicherung der Energie in kinetischer Form ein Mittel an die Hand gibt zur Erzeugung großer, fast beliebig großer Kräfte.

Übrigens hat man in neuerer Zeit gelernt, die zum Schmieden von Eisenstücken nötigen großen Kräfte in weniger geräuschvoller Weise zu erzeugen, als es im Dampfhammer geschieht. Abbildung 7 zeigt links neben dem Dampfhammer eine Schmiedepresse, in der Druckwasser den (blank herausschauenden) Kolben abwärtsdrückt, und zwar je nach der Spannung des Wassers und der Größe des Kolbens mit für das Schmieden ausreichender Kraft. Geräuschlos bewegt sich der schwere Stempel auf und nieder, wie handgesteuerte Ventile es ihm befehlen. Dabei dient dem Aufwärtsgang ein kleiner Kolben, der ganz oben blank herausschaut und durch zwei Zugstangen das Joch mit dem Stempel hebt, während abwärts der große Kolben große Kräfte ausüben läßt.

ZERREISZEN VON STÄBEN. Eine wichtige und interessante, dabei weniger bekannte Beobachtung aus dem gleichen Gebiet ist die folgende, die auf das technische Verhalten der Baustoffe ein helles Licht wirft.

Die Festigkeit von Eisen und anderen Baustoffen ermittelt man in der Zerreißmaschine. Ein Stab von bekannten Abmessungen, meist ein Rundstab von 20 mm Durchmesser, wird in die Maschine eingespannt und solcher Zugkraft ausgesetzt, daß er zerreißt. Abbildung 9 zeigt eine Zerreißmaschine, bei der ein Elektromotor (nicht sichtbar) eine Ölpreßpumpe antreibt, und bei der das Preßöl in den Druckzylinder tretend den Stab zieht. Die Zugkraft kann man aus dem Öldruck berechnen, den ein Manometer anzeigt. Die Figur zeigt, daß der zu prüfende Stab — er hat flachen Querschnitt, nicht runden — klein ist im Verhältnis zu dem Aufbau, der zur Erzeugung der Kräfte nötig ist; muß doch die Prüfmaschine stark genug gebaut sein, um die nicht unerhebliche Kraft auszuhalten, die zum Zerreißen des Stabes erforderlich ist, damit eben der Stab und nicht etwa die Maschine zerbricht. Man hat Prüfmaschinen bis zu Kraftäußerungen von mehr als einer Million Kilogramm gebaut, und Lieferanten wie auch Käufer von Baustoffen sind heutzutage mit solcher Maschine versehen, um die vorkommenden Materialien auf ihre Festigkeit prüfen zu können.

Abbildung 9. Zerreißmaschine für 20 000 kg Kraftäußerung. Amsler-Laffon & Sohn, Schaffhausen.

Abbildung 10 zeigt einen neuen Stab mit den beiden zum Einspannen in die Zugvorrichtung dienenden Köpfen; sie zeigt weiter, wie der Stab sich vor dem Zerreißen an einer Stelle „einschnürt“, und zeigt endlich den gerissenen Stab.

Bei der Untersuchung von Stäben beobachtet man nun auch, wie stark sich die Stäbe unter dem Einfluß der Zugbelastung ausdehnen. Denn eine allgemeine Eigenschaft der Materialien ist es, daß sie unter dem Einfluß einer Belastung dieser nachgeben, also daß sie sich längen, wenn man sie auf Zug beansprucht, daß sie sich aber verkürzen, wenn man sie drückt. Die Baustoffe erleiden unter dem Einfluß der auf sie wirkenden Kräfte Formänderungen, die teilweise elastisch sind, d. h. wieder verschwinden, wenn die Kraft aufhört zu wirken, die teilweise aber auch bleibend sind, d. h. nicht wieder verschwinden. Gummi ist ausgezeichnet durch sehr weitgehende elastische Formänderungen, seine bleibenden Formänderungen sind gering. Ton oder Blei sind ausgezeichnet dadurch, daß elastische Formänderungen fast fehlen,

während bleibende Formänderungen ihnen leicht zu erteilen sind. Ein in eine Gummiplatte gemachter Fingereindruck verschwindet wieder, ein in Ton gemachter aber nicht.

Wenn wir von diesen extremen Fällen absehen, so erleiden auch die übrigen Baustoffe Formänderungen. Wie könnte eine Brückenkonstruktion zittern unter den Erschütterungen, wie könnte sie sich durchbiegen unter der Last des darüberfahrenden Eisenbahnzuges, wenn nicht jeder einzelne Stab der Konstruktion eine entsprechende Nachgiebigkeit zeigte?

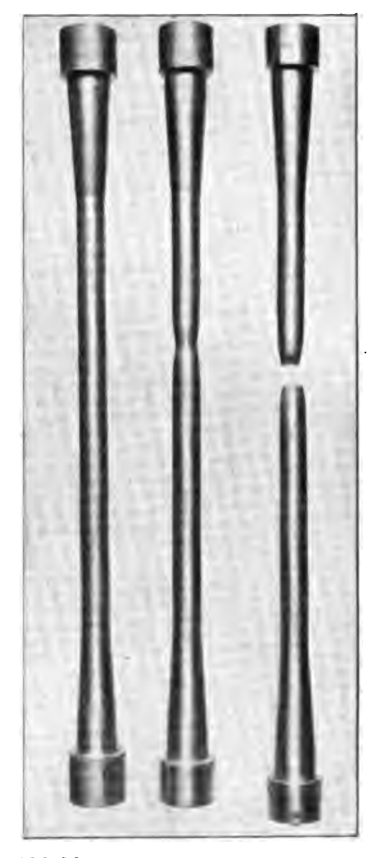


Abbildung 10. Versuchsstab unverletzt, eingeschnürt und zerrissen.

In der Materialprüfmaschine beobachtet man nun, wie schon erwähnt, die allmähliche Dehnung des Stabes unter dem Einfluß der ihn ziehenden Kraft und erhält dabei das folgende für Schmiedeeisen charakteristische Dehnungsdiagramm. Wir haben in Abbildung 11 im wagerechten Sinne die Dehnung des untersuchten Stabes aufgetragen, im senkrechten Sinne die Kräfte, die nötig sind, um dem Stabe die fragliche Dehnung zu erteilen. Beide Größen sind aber, um Stäbe verschiedener Abmessungen miteinander vergleichen zu können, auf die Einheit des Querschnittes (etwa Quadratzentimeter) und auf die Einheit der Länge bezogen. Haben wir einen Stab von 2 cm Durchmesser, also von 3,14 qcm Querschnitt, mit 10000 kg Kraft belastet, so ist die „Spannung“ 10000 : 3,14 kg für jedes Quadratzentimeter Querschnitt, seine Spannung ist 3200 kg pro Quadratzentimeter. Hat sich anderseits unter dieser Belastung ein Stück des Stabes, dessen Länge wir im spannungslosen Zustande zu 100 mm gemessen und durch feine Striche kenntlich gemacht hatten, unter dem Einfluß dieser Belastung auf 102 mm verlängert, so sagen wir, die „Dehnung“ des Stabes sei 2 % seiner (ursprünglichen) Länge, oder auch sie sei 0,02, wenn man nämlich die ursprüngliche Länge des Stabes gleich Eins setzt. Durch solche Bezeichnungsweise kann man das Verhalten der Materialien unabhängig von den besonderen Abmessungen angeben.

Die Spannungen des Stabes sind nun in Abbildung 11 abhängig von den Dehnungen aufgetragen, die sie verursachen, und es ergibt sich folgendes Bild. Zunächst in Punkt 0 gehört zu der Last Null die Dehnung Null. Sodann steigt mit zunehmender Belastung auch die Dehnung, und zwar bleiben beide einander proportional bis etwa zum Punkte P. Bis hierher verursacht also die doppelte Kraft auch eine doppelt so große Dehnung, oder umgekehrt: wir können (bei der Feder einer Federwage etwa) aus der dreifachen Dehnung auf eine dreifache Kraft schließen. In einem gewissen Punkte P aber beginnt die Dehnung verhältnismäßig schnell zu wachsen, der Stab beginnt zu fließen, wie man es wohl nennt, und ohne daß noch wesentlich größere Kräfte als die bei Punkt P schon erreichten erforderlich wären, erreicht man in M, bei bereits ziemlich beträchtlicher Dehnung, das Maximum der Kraft, und wenn die Dehnung ohne weitere Vermehrung der Kraft bis B gewachsen ist, erfolgt der Bruch.

Es ist wohl klar, daß man in den Bereich der Belastungen von P bis B nicht gehen darf, in dem fast ohne Wachsen der aufzuwendenden Kraft weiter und weiter ein Dehnen des Stabes stattfindet; eine so hohe Inanspruchnahme der Baustoffe ist nicht statthaft. Man beobachtet daher beim Versuch in der Prüfmaschine den Punkt P, bis zu dem Kräfte und Dehnungen proportional miteinander wachsen, und bis zu dem hin auch die Dehnungen überwiegend elastisch sind, den man deshalb wohl als Proportionalitätsgrenze oder Elastizitätsgrenze* bezeichnet, als Kennzeichen für die höchstmögliche Belastung des Stabes, von der man übrigens aus Sicherheitsgründen noch ein erhebliches Stück zurückbleibt: meist geht man nur bis zu 1/4 oder 1/5 dieser Spannung und sagt dann, die Konstruktion biete vierfache oder fünffache Sicherheit, das heißt, es sei das Vierfache oder Fünffache der zu erwartenden Belastung nötig, um den Bruch des Stabes herbeizuführen.

Doch wir wollten davon sprechen, daß nicht die Kraft allein, die dem Stabe zugemutet werden darf, und die durch Beobachten der Proportionalitätsgrenze ermittelt werden könnte — daß nicht diese Kraft allein für die Beurteilung der Baustoffe maßgebend sei: wir haben nämlich in dem Diagramm (Abbildung 11) wieder ein Arbeitsdiagramm vor uns, da wir die Wege, die das Stabende zurücklegt, als abhängig von den Kräften aufgetragen haben, die auf das gleiche Ende des Stabes ausgeübt werden mußten. Daher wird die schraffierte Fläche, die unter der Kurve unseres Diagramms liegt, diejenige Arbeit darstellen, die zum Zerreißen des Stabes aufzuwenden ist, also verfügbar sein muß; und die enger schraffierte Fläche OPD stellt die Arbeit dar, die nötig ist, um den Stab bis zur Proportionalitätsgrenze zu dehnen.

Ob nun ein Stab — etwa ein Glied einer Brückenkonstruktion — zerreißt oder hält, ob er bleibende Dehnungen erleidet oder nur elastische, das hängt, solange ruhende Kräfte auf ihn wirken, etwa wenn der Eisenbahnzug auf der Brücke steht, nur von der ausgeübten Kraft ab, also vom Gewicht des Eisenbahnzuges. Sobald es sich aber nicht nur um ruhende Kräfte handelt, sobald der Zug über die Brücke fährt und Erschütterungen verursacht, dann liegt der Fall wie bei dem Rammbär oder dem Hammer: es treten nicht mehr bestimmte Kräfte auf, sondern es sind bestimmte Arbeitsmengen verfügbar für etwa eintretende Zerstörungen des Stabes, und derjenige Baustoff wird gegenüber Erschütterungen besser standhalten können, der die größere Arbeitsfläche unter seinem Spannungs-Dehnungs-Diagramm (Abbildung 11) aufweist.

Wenn man die Baustoffe bis zur Proportionalitätsgrenze in Anspruch nimmt, so können sich zwei Baustoffe verhalten, wie in Abbildung 12 dargestellt: Für beide Stoffe 1 und 2 seien die Spannungen den Dehnungen proportional, für beide haben wir angenommen, daß bis zur gleichen Belastung P_1 und P_2 die Proportionalität vorhanden ist, daß sie also gleiche Kräfte aufzunehmen in der Lage sind. Dann wird die bis zum Eintreten dieser Kraft von dem Stabe aufgenommene Arbeit, die von den erschütternden Massen geleistet werden muß, um so größer ausfallen, je stärker der Stab sich bis zum Erreichen dieser Kraft dehnt: die Arbeitsfläche I ist kleiner als die Arbeitsfläche II.

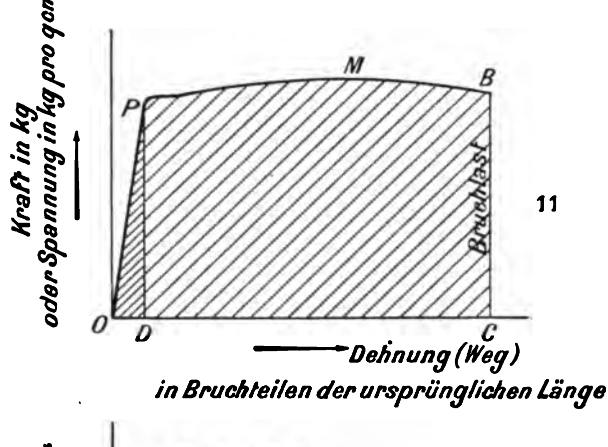
Stahl hat im allgemeinen etwas größere Festigkeit als Eisen, er weist außerdem größere Dehnungen auf, sowohl bis zur Proportionalitätsgrenze als auch bis zum Bruch. Das ist der Grund für die Überlegenheit guten Stahls als Baustoff gegenüber weniger dehnbaren Eisensorten. Man kann daher bei in Stahl hergestellten Bauten,

---

* Beide Grenzen brauchen nicht eigentlich zusammenzufallen, tun es aber bei Eisen befriedigend.

trotz nicht viel größerer Festigkeit des Stoffes, doch leichter bauen, weil man mit geringerem Sicherheitsüberschuß für den Fall von Erschütterungen rechnen darf. Leichtere Bauweise aber bedingt, selbst wenn wegen des relativ hohen Preises besserer Baustoffe die Materialkosten höher ausfallen, erhebliche Ersparnisse an Transport- und Aufstellungskosten, und bei Brücken kommt in Frage, daß sie sich ja selbst tragen müssen; auch Automobile und Schiffe sollen möglichst leicht sein, weil ihr eigenes Gewicht als tote Last mitgeschleppt werden muß. In solchen Fällen verwendet man also beste Baustoffe fast ohne Rücksicht auf den Preis; die besten Stahlsorten (Chromstahl, Wolframstahl u. dgl.) rangieren im Preise freilich fast unter den Edelmetallen: das Kilogramm kostet bis zu 10 M. (Kupfer nur 2½ M.!).

Man kann die moderne Anschauung hinsichtlich der Güte der Baustoffe, die, wie man sieht, letzten Endes auf dem Energiegesetz beruht, zusammenfassen, indem man sagt: bei gleichen erschütternden Ursachen wird der dehnbare Stoff (Stahl) sich nur dehnen oder biegen, wo der weniger dehnbare (Schmiedeeisen oder gar Gußeisen) bricht. Wo es sich um Biegen oder Brechen handelt, ist offenbar das erstere vorzuziehen.



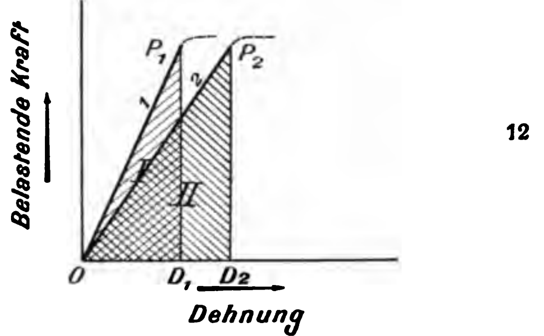


Abbildung 11. Spannungs-Dehnungs-Diagramm für einen Eisenstab.

Abbildung 12. Verhalten zweier Baustoffe gleicher Festigkeit, aber verschiedener Dehnung.

Man bemüht sich heute überall, nicht nur den ruhend auftretenden statischen Kräften, sondern auch den dynamischen Kräften Rechnung zu tragen, die immer dann in die Konstruktion kommen, wenn sie Bewegungen ausführt oder auch nur Erschütterungen ausgesetzt ist. Man hat erkannt, daß in zahlreichen Fällen die dynamische Beanspruchung die statische um ein Vielfaches übertrifft, zumal es sich heute mehr und mehr um Steigern der Geschwindigkeiten aller Bewegungen handelt, an Maschinen wie bei Eisenbahnen, Fahrstühlen und ähnlichem.

Eine interessante Folgerung aus der eben vorgetragenen Auffassung ist noch die, man solle, wo immer es angeht, Körper gleicher Festigkeit für die Konstruktionen verwenden. Wenn ein auf Zug beanspruchter Rundstab (Abbildung 13) am Ende mit einer Mutter befestigt ist, die ihn mittels des Gewindes faßt, so ist an der Stelle, wo Schraubengewinde auf den Stab geschnitten ist, sein Querschnitt hierdurch geschwächt, nämlich um die Gangtiefe des Gewindes. Daher ist für die Frage, welche Kraft nötig ist, um den Stab zu zerreißen, jener geschwächte Querschnitt in Rechnung zu ziehen.

Man könnte nun zweierlei machen, nämlich die übrige, nicht mit Gewinde versehene Länge so stark lassen, wie sie vorher war, also gleich dem äußeren Durch-

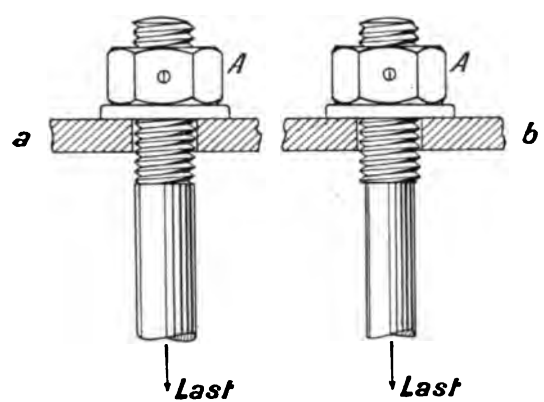


Abbildung 13. Kopf eines Tragankers.
a Schaft unnötig stark, Schwächung durch Gewinde — b Ausführung als Körper gleicher Festigkeit, Schaft auf Kerndurchmesser verschwächt.

messer des Gewindes (Abbildung 13 links); man könnte sie aber auch so weit schwächen, daß sie auch nur die Stärke und daher die Tragkraft des Gewindekerns hat (Abbildung 13 rechts). Letztere Ausführung wird wegen der schwierigen Herstellung leicht kostspieliger; es fragt sich, ob sie Vorteile bietet.

Solange wir nur statisch betrachtend einfach die Kraft in Rechnung ziehen, die der Stab höchstens erleiden darf, scheint die Schwächung des Stabes zwecklos zu sein, und man könnte meinen, zu aller Sicherheit solle man dem Stabe immerhin die volle Stärke lassen. Zu anderen Ergebnissen führt eine dynamische Betrachtung. Wenn Erschütterungen oder Stöße in die Konstruktion kommen, wird der geschwächte Stab zuverlässiger sein als der stärkere, deshalb nämlich, weil er sich bis zum Eintreten der größten Kraft stärker gedehnt hat. Das Kraft-Weg-Diagramm Abbildung 14 läßt erkennen, daß für die Stäbe I und II die Verhältnisse genau so liegen wie für Stäbe aus verschieden dehnbarem Material (Abbildung 12). Ein durchweg stärkerer — nicht durch Gewinde geschwächter — Stab hielte natürlich statisch und dynamisch noch mehr aus, wie ebenfalls Abbildung 14 zeigt.

Die dynamische Betrachtung zeigt also, daß es unzweckmäßig ist, Konstruktionen an einzelnen Stellen stärker zu belasten als an anderen, die das gleiche auszuhalten haben. Wo man die wirkenden Kräfte nicht sicher einschätzen kann, da soll man doch die Konstruktion als Körper gleicher Festigkeit ausbilden, so also, daß an allen Stellen gleichzeitig die höchste zulässige Spannung erreicht wird. Sie besitzt dann die größtmögliche Elastizität. Deshalb sind zum Beispiel die starken Stößen ausgesetzten Speichen von Fahrrädern schwach, aber in der Gewindegegend verstärkt; das gibt dort zugleich die leichteste Konstruktion.

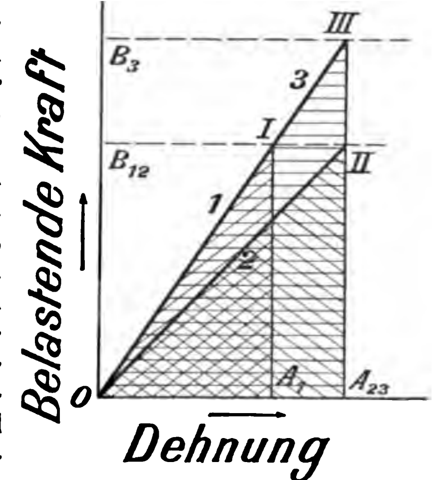


Abbildung 14. Kraft-Weg-Diagramm für den Traganker.
I Schaft unnötig stark, Schwächung durch Gewinde — II Ausführung als Körper gleicher Festigkeit, Schaft auf Kerndurchmesser verschwächt — III Verhalten eines durchweg stärkeren Ankers.

Übrigens handelt es sich bei allem diesem auch um vielfach bekannte Erfahrungstatsachen. Ein Gummifaden und ein Zwirnsfaden werden vielleicht, wenn man Gewichte vorsichtig an sie anhängt, gleich viel aushalten können. Wollte man sie mit einem Schlage durchreißen, so gelingt das beim Zwirnsfaden leicht, nicht aber bei dem dehnbaren Gummifaden, der durch seine Nachgiebigkeit die Schlagarbeit aufzehrt, ehe er zum Reißen kommt; und ein kurzer Faden ist durch Schlag leichter zu zerreißen als ein langer.

ENERGIEUMSETZUNGEN BEI FLÜSSIGKEITEN. Bei Flüssigkeiten gelten die gleichen Beziehungen zwischen Kraft, Weg und Arbeit wie bei festen Körpern. Immerhin sind sie, äußerlich ge-

nommen, so weit abweichend, daß wir gut tun, die bei Flüssigkeiten eintretenden Verhältnisse im Zusammenhang durchzusprechen.

In Abbildung 15 ist, schematisch skizziert, ein Wasserkraftwerk dargestellt, das

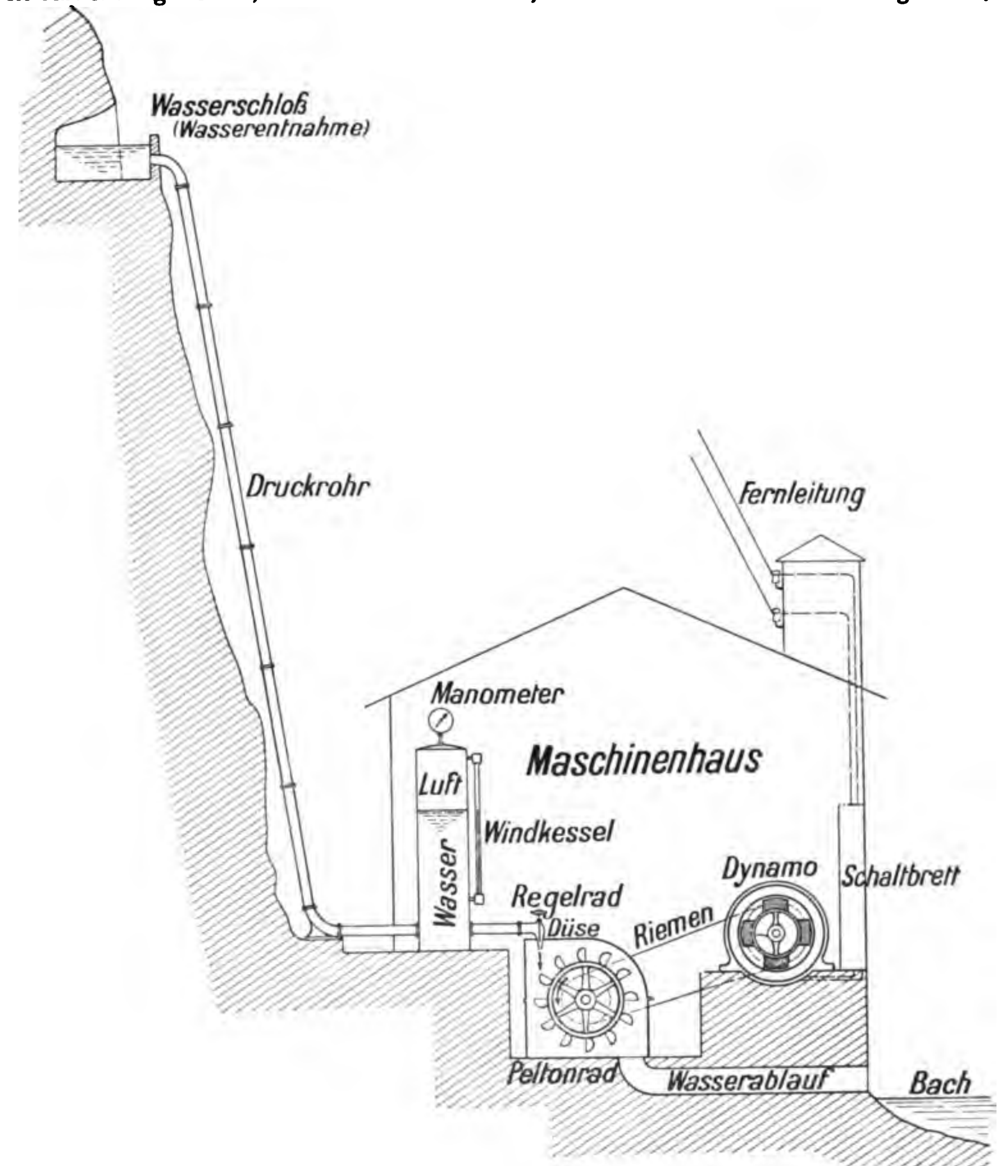


Abbildung 15. Schematische Darstellung eines Wasserkraftwerkes.

alle Umsetzungen der Energie am Wasser zeigt. Das Wasser wird einem Graben entnommen, der an der Lehne des Berges entlang geführt ist, und wird durch das am Abhang verlegte Druckrohr in das Maschinenhaus geführt, in dem es durch einen Windkessel hindurchgehend aus einer Düse austritt und gegen die Schaufeln eines Peltonrades trifft, dieses in der Pfeilrichtung treibend. Das Peltonrad (Abbildung 16) ist in einem Gehäuse eingeschlossen, aus dem die Welle herausgeht, die nun mittels

Riementriebes eine Dynamomaschine antreibt. Die im Peltonrad erzeugte mechanische Arbeit wird der Dynamo mitgeteilt und von ihr in elektrische Energie verwandelt, die durch die Drähte der Fernleitung beliebig fortgeleitet werden kann. Das Schaltbrett läßt die elektrische Energie regeln. Abbildung 17 zeigt den Blick auf ein solches Kraftwerk und läßt namentlich die Druckleitungen gut erkennen.

Die Energie macht folgende Wandlungen durch: sie steht zunächst in potentieller Form zur Verfügung, d. h. der Höhenunterschied zwischen dem Oberwassergraben und dem Bach, das verfügbare Gefälle, bedingt die Energie. Wenn das Wasser unten im Windkessel ankommt, ist seine hohe Lage nicht mehr vorhanden; sie hat sich in Druck umgesetzt, wie man am Manometer des Windkessels erkennt. Auch Druck bedingt also einen Energieinhalt des Wassers. Ist er im vorliegenden Falle auch durch die von oben infolge des Gefälles nachdrängenden Wassermassen erzeugt und gewissermaßen identisch mit dem Gefälle, so ist das doch nicht nötig; es gibt Preßwasseranlagen, in denen der Druck durch Preßpumpen erzeugt wird, wie wir das bei der Schmiedepresse (Abbildung 7) und der Materialprüfmaschine (Abbildung 9) sahen.

In der weiten Druckleitung bewegt sich das Wasser mit sehr geringer Geschwindigkeit. Aber wenn in der Düse, beim Austritt aus dem Rohr, der Druck verschwindet, so setzt er sich in Geschwindigkeit um. Nun ist in dem aus der Düse ausgetretenen

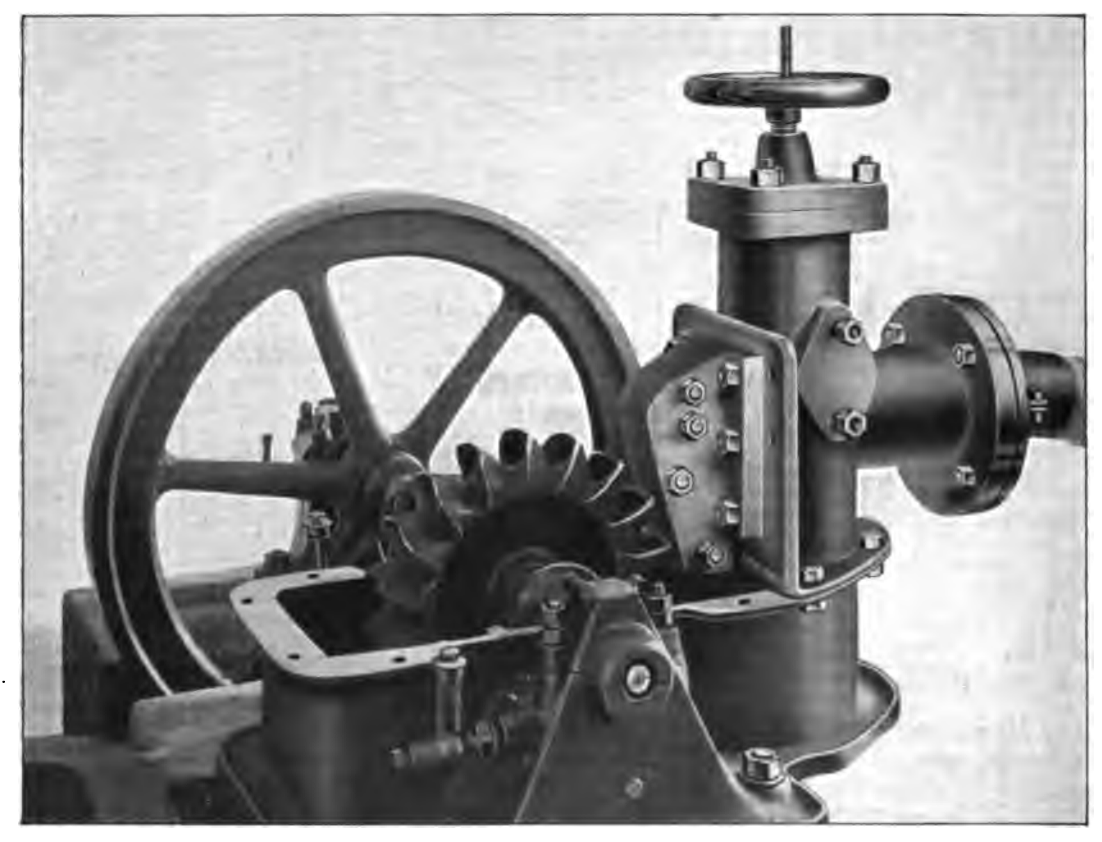


Abbildung 16. Peltonrad.
Das Wasser kommt von rechts und trifft in senkrechtem Strahl tangential auf die Schaufelung.

Wasserstrahl die Energie als kinetische enthalten, und indem das Rad durch den Wasserstrahl vorwärtsgetrieben wird, wird die kinetische Energie des Wassers in mechanische Arbeit umgesetzt, das heißt das Rad wird trotz des Widerstandes der Dynamomaschine, den zu überwinden sein Zweck ist, vorwärtsgetrieben. Daß ein Wasserstrahl beim Auftreffen auf die Radschaufeln Kräfte ausübt, wird verständlich, wenn man sich an die Gewalt strömenden Wassers bei Überschwemmungen erinnert oder an den Schmerz, den der scharf auf den Körper treffende Strahl einer Spritze auf den Körper ausübt, oder endlich daran, wie man sich in strömendem Wasser nicht aufrechthalten kann.

Je nachdem eine bestimmte Wassermenge mit einem ausnutzbaren Gefälle, oder unter Druck, oder mit Geschwindigkeit verfügbar ist, ist Energie in deutlich voneinander verschiedenen, aber ineinander umsetzbaren Formen vorhanden.



Abb. 17. Blick auf ein Wasserkraftwerk und auf die Druckleitungen.
Aus „Zeitschrift f. d. ges. Turbinenwesen" 1906. (Verlag R. Oldenbourg, München.)

Der Betrag verfügbarer Energie ist, wenn in Gestalt von Gefälle gegeben, einfach zu berechnen: wo G kg Wasser sekundlich bei einem Gefälle von H m verfügbar sind, können $G \times H$ Meterkilogramm sekundlich an Arbeit erzeugt werden; die verfügbare Leistung ist $\frac{G \times H}{75}$ PS. Wäre die Wassermenge Q in cbm gegeben, so wäre zu bedenken, daß 1 cbm Wasser 1000 kg wiegt, so daß $\frac{1000\,Q \times H}{75}$ PS verfügbar sind.

Ist der Druck p des Wassers in Atmosphären, d. h. in kg pro qcm, gegeben, so berücksichtige man, daß 10 m Wassersäule = 1 kg/qcm sind (weil nämlich eine Wassersäule von 1 qcm Querschnitt und 10 m Höhe 1 kg wiegt). Also ist $\frac{1000\ Q \times 10\ p}{75} = \frac{10000\ Q \times p}{75}$ die verfügbare Leistung. Letztere Formel gibt auch die Leistung, die durch eine Druckwasserleitung hindurch übertragen wird, wenn in ihr Q cbm Wasser sekundlich gegen einen Gegendruck von p Atmosphären fortgedrückt werden. Sie gilt auch für andere Flüssigkeiten als Wasser.

Eine Wasserkraftanlage mit 50 m Gefälle, die 0,150 cbm Wasser sekundlich = 150 l = 150 kg zur Verfügung hat, kann also $\frac{50 \times 150}{75} = 100$ PS entwickeln oder vielmehr nur $100 \times 0{,}6 = 60$ PS, wenn man den Wirkungsgrad der Anlage zu 0,6 schätzen darf. Eine andere Anlage, die 5 m Gefälle, aber dafür 1,5 cbm sekundlich hat, kann auch 100 PS bzw. 60 PS leisten.

Wenn in einer Preßwasserleitung das Wasser 100 Atmosphären Druck hat, und wenn 7,5 l sekundlich = 0,0075 cbm sekundlich durch die Leitung gehen, dann werden auch wieder $\frac{10000 \times 100 \times 0{,}0075}{75}$ = 100 PS übertragen.

Die Konstruktion des Peltonrades, in dem also die Geschwindigkeit des unter Druck ausgetretenen Wasserstrahls ausgenutzt wird, geht genauer aus Abbildung 16 hervor. Man erkennt, zumal im Vergleich zu Abbildung 15, den Wasserzulauf und ein Handrad zum Regeln desselben. Die Düse richtet den Strahl abwärts, was man nicht deutlich erkennen kann. Die Schaufeln haben eigentümliche doppeltaschenförmige Gestalt. An den gekrümmten Innenwänden der Taschen wird der Strahl so abgelenkt, daß er seine Geschwindigkeit verliert, dabei den Radumfang in der Strahlrichtung vorwärtstreibend. Wovon es abhängt, daß möglichst alle Geschwindigkeit in Arbeit umgesetzt wird, werden wir bald sehen.

Im Peltonrad wird zunächst der Druck in Geschwindigkeit umgesetzt, und erst die der Geschwindigkeit entsprechende kinetische Energie wird durch Auftreffen auf die bewegten Schaufeln des Rades in mechanische Arbeit verwandelt. Dieser Umweg über die kinetische Energie ist nicht nötig: man kann den Druck auch ohne weiteres zur Arbeitslieferung heranziehen, wie es in einfacher Weise beim Segnerschen Reaktionsrad geschieht. Im Reaktionsrad tritt nämlich das Wasser, unter Druck stehend, in einen um eine senkrechte Achse rotierenden mehrarmigen Drehkörper ein (Abbildung 18), dem durch eine Drehstopfbüchse die Beweglichkeit gesichert ist. Denken wir zunächst, die Arme seien ganz verschlossen, so wird kein Wasser austreten und keine Bewegung entstehen können. Wenn wir aber an jedem der Arme, und zwar an allen nach gleicher Drehrichtung, Löcher anbringen, so fehlt dort die Wand, und die auf sie ausgeübte Kraft fällt fort, während sie auf die korrespondierende gegenüberliegende Wandfläche noch wirkt. So wird eine Bewegung des ganzen Armkreuzes eingeleitet, wenn die Öffnungen den Strahl in der Ebene des Armkreuzes austreten lassen. Die Drehung erfolgt in der Richtung, daß das Wasser hinten an den Armen austritt. Dabei nimmt das Wasser zu keiner Zeit erhebliche Geschwin-



Abbildung 18. Praktische Anwendung des Segnerschen Reaktionsrades: Sprinkler (Sprenger) für biologische Klärung städtischer Abwässer; das Armkreuz läuft durch die Reaktion des ausgesprengten Wassers um; hinten der Wasserbehälter.

digkeiten an; denn der Querschnitt der Arme ist verhältnismäßig groß, und in den Bohrungen, durch die das Wasser austritt, muß es zwar mit einer gewissen größeren Geschwindigkeit hindurchtreten, doch lassen sich bei richtigem Betriebe die Verhält-

nisse so abpassen, daß die Durchflußgeschwindigkeit des Wassers durch die Austrittsöffnung gleich, aber entgegengesetzt der Bewegung ist, die die Öffnung selbst (also das Rad) bei der Rotation hat.* Dann wird also das austretende Wasser im Raume stillstehen und nur infolge seiner Schwere zu Boden fallen. Es muß erstrebt werden, daß die austretenden Flüssigkeitsteilchen keine Bewegung im Raume machen, denn jede ihnen beim Austritt noch innewohnende kinetische Energie wäre für den nutzbaren Betrieb verloren: je vollkommener man den Austrittsverlust vermeidet, desto besser der Wirkungsgrad des Rades. Dabei darf man sich nicht durch den Augenschein täuschen lassen, wenn nämlich der austretende Wasserstrahl Parabelform hat (Abbildung 19). Wenn das der Fall ist, dann kann doch sehr wohl jeder einzelne Tropfen senkrecht zu Boden fallen und nur durch die Rückwärtsbewegung des Rades der Eindruck erweckt werden, als beschreibe er eine Parabel und habe also eine Geschwindigkeit entgegen der des Rades. Es ist wie bei dem Rauch eines Dampfers, der (bei ruhiger Luft) nach hinten zu schweben scheint; in Wahrheit steht er still, und das Schiff bewegt sich unter ihm fort.

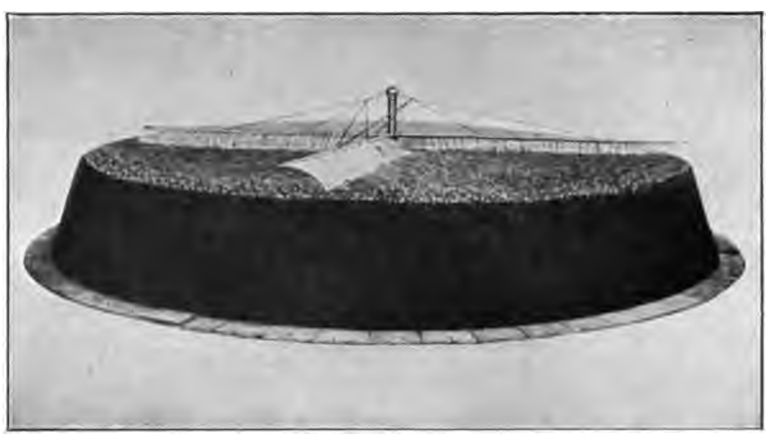


Abbildung 19. Sprinkler von 24 m Durchmesser, in Tätigkeit: das städtische Abwasser wird über einen Kokskörper (Koksschüttung) verteilt. Wilhelm Wurl, Berlin-Weißensee.

Es ist also in der Tat eine Umsetzung des Druckes in mechanische Arbeit ohne das Zwischenglied der Geschwindigkeit möglich. Die doppelte Möglichkeit der Umsetzung muß im Auge behalten werden, wenn es sich darum handelt, den Unterschied zwischen den Freistrahlturbinen und den Reaktionsturbinen zu verstehen, deren erstere nämlich durch die Wirkung des freien Strahls (Peltonrad), deren letztere aber durch die Wirkung des Rückdruckes oder der Reaktion (Segnerrad) den Energieinhalt des Wassers ausnutzen. Auch bei Dampfturbinen besteht der gleiche Unterschied, auf den späterhin noch einzugehen sein wird.

Hat man im Reaktionsrad die Umsetzung des Wasserdruckes in Geschwindigkeit vermieden, so kann man auch noch einen Schritt weiter gehen und das Gefälle ganz direkt ausnutzen, ohne es auch nur erst in Druck umzusetzen. Das geschieht in dem allerdings altmodischen Wasserrad. Eins der größten je ausgeführten Wasserräder ist das auf der Insel Man im irischen Kanal aufgestellte Rad, das in Abbildung 20 dargestellt wird. Es hat 22 m Durchmesser und dient zum Antreiben der Pumpen, die die Kohlengruben zu entwässern haben. Im Wasserrad wirkt unmittelbar die Schwerkraft des Wassers treibend, indem das Wassergewicht einer Radhälfte das Über-

* Da die verschiedenen Löcher verschiedenen Abstand von der Drehachse haben, so läßt sich das genau nur für einzelne erreichen. Gerade beim Sprinkler kommt es nicht auf gute Ausnutzung der Energie, sondern nur auf gleichmäßige Verteilung des Wassers an.

gewicht gibt und das Rad dreht. Aber in der Abbildung erkennen wir sogleich die schwache Seite der Wasserräder, daß nämlich ihr Durchmesser so groß sein muß wie das auszunutzende Gefälle. Dadurch wird man bei großen Gefällen auf unförmige Raddurchmesser geführt; von einer Ausnutzung von Gefällen von mehreren hundert Metern kann gar nicht die Rede sein. Anderseits werden die Wasserräder auch unhandlich, wenn sehr kleine Gefälle auszunutzen sind, wobei dann meist — denn sonst lohnt die Ausnutzung nicht — große Wassermengen zur Verfügung stehen. Man kommt auf sehr kleine Durchmesser des Rades, muß es aber sehr breit machen, damit die große zu verarbeitende Wassermenge von den Taschen einer Radhälfte aufgenommen werden kann, und damit nicht ein Teil des Wassers über die gefüllten Taschen hinwegschießt. Man war also bei der Verwendung des Wasserrades an enge Gefällsgrenzen gebunden und baut es deshalb heute kaum noch.



Abbildung 20. Wasserrad auf der Insel Man; das Wasser kommt durch den gemauerten Turm und läuft auf das Rad. — Oben rechts zum Vergleich ein Peltonrad gleicher Leistung.

Im ganzen aber erkennen wir, daß die Ausnutzung der Wasserkraft in den drei umlaufenden Maschinen in verschiedener Weise vonstatten geht: das Peltonrad nutzt Wassergeschwindigkeit, das Segnersche Reaktionsrad nutzt Wasserdruck, und das alte Wasserrad nutzt Wassergefälle zur Erzeugung mechanischer Arbeit aus. In der Anlageskizze Abbildung 15 wird ein großes verfügbares Gefälle zunächst in Druck verwandelt, dieses zur Erzeugung von Geschwindigkeit ausgenutzt, weil nämlich ein Peltonrad zu betreiben war. Wir hätten die Umsetzung in Geschwindigkeit umgangen, wenn wir eine unmittelbar auf Druckwirkung beruhende Maschine gewählt hätten, etwa das Reaktionsrad, und wir hätten auch die Umsetzung in Druck vermeiden können, wenn wir das Gefälle durch ein großes Wasserrad ausgenutzt hätten. Charakteristisch aber ist es, daß, von Unterschieden des Wirkungsgrades verschiedener Maschinenarten natürlich abgesehen, stets die gleiche mechanische Arbeit zu erhalten ist, welchen Weg oder Umweg wir zu ihrer Erzeugung auch wählen mögen: das eben liegt im Gesetz von der Erhaltung der Energie. In Fällen, wo uns nicht zunächst eine Niveaudifferenz zur Verfügung steht, sondern wo der Wasserdruck anderweit erzeugt ist, wie etwa in Preßwasseranlagen, würde das Wasserrad von vornherein ausscheiden, im übrigen wieder die unmittelbare Ausnutzung des Druckes durch Reaktionswirkung im Segnerrad oder der Umweg über die Geschwindigkeit im Peltonrad möglich sein.

Die Ausnutzung des Druckes ist übrigens auch möglich statt durch rein umlaufende Maschinen (Kreiselradmaschinen) durch Verwendung einer Kolbenmaschine. Kolbenmaschinen haben freilich als mit Wasser betrieben nur für Sonderzwecke Bedeutung

erlangt. Immerhin hat man „Wassersäulenmaschinen“ in Betrieb gehabt, zu Zeiten, wo der Turbinenbau noch wenig entwickelt war, und wo man kein anderes Mittel hatte, um Gefälle auszunutzen, die für das Wasserrad zu groß waren. Noch heute

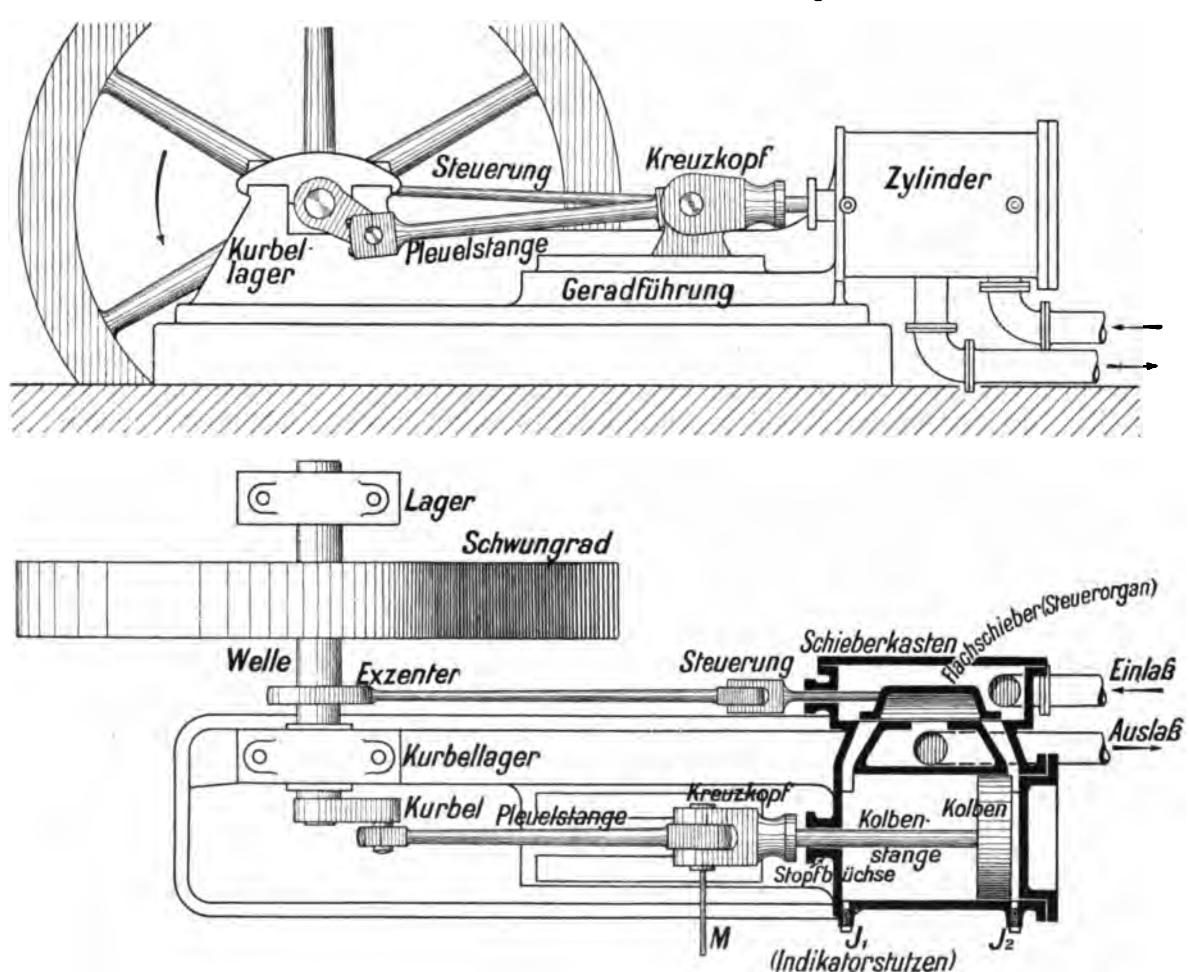


Abbildung 21. Schematischer Aufriß und Grundriß einer Kolbenkraftmaschine, mit (Druckwasser, Druckluft oder) Dampf zu betreiben. Im Grundriß ist der Zylinder geschnitten gedacht; die Schnittflächen sind geschwärzt. Die bewegten Teile sind — im Gegensatz zum Maschinengestell und Zylinder — durch Schattierung hervorgehoben.

verwendet man bei Tunnelbauten die mit Druckwasser betriebenen Brandtschen Bohrmaschinen: Preßwasser dreht dabei die Bohrer zum Vorwärtstreiben der Sprenglöcher, in die dann die Sprengladung kommt.

Eine Wassersäulenmaschine könnte man nach Abbildung 21 bauen, die einer Dampfmaschine durchaus gleich ist. Wir wollen an dieser Abbildung mit wenigen Worten das Wesentliche jeder Kolbenmaschine erläutern. Es wird, um die umlaufende Bewegung zu erzeugen, zunächst eine hin und her gehende eingeleitet, indem der Druck des Wassers (oder bei der Dampfmaschine der Druck des Dampfes) abwechselnd auf die beiden Seiten eines Kolbens wirkt, der sich in dem Zylinder der Ma-

schine abgedichtet bewegt. Abwechselnd wird daher die Kolbenstange drücken und ziehen und dadurch die Kurbel in Bewegung setzen. Zur Übertragung der hin und her gehenden Bewegung in eine umlaufende dient die Pleuelstange, deren eines Ende mit der Kurbel umläuft, deren anderes Ende mit dem Kreuzkopf hin und her geht. Da die Maschine an den Hubenden stehenbleiben würde, so braucht sie ein Schwungrad, um die Welle über diese Totpunkte hinüberzubringen. Das Schwungrad dient dann vielfach gleich zum Auflegen des Riemens, der die gelieferte mechanische Arbeit weiterleiten soll.

Nun muß aber der Druck abwechselnd auf die beiden Kolbenseiten wirken, und dazu muß stets die richtige Zylinderseite mit der Druckleitung in Verbindung gebracht werden, während die andere Zylinderseite ohne Druck sein und das Wasser ins Freie entlassen muß. Um im richtigen Takt jede Kolbenseite abwechselnd mit der Druckleitung und mit dem Freien in Verbindung zu bringen, dazu dient die Steuerung. Man kann jedes Absperrorgan für die Steuerung verwenden, beispielsweise Hähne, und in der Tat hat man Maschinen, bei denen jede Zylinderseite mit zwei Hähnen versehen ist, einen zum Einlassen, einen zum Auslassen des arbeitenden Mittels; die Hähne werden von der Maschine selbst betätigt. Ein für die Dampfmaschine charakteristisches und auch für die Wassersäulenmaschine brauchbares Steuerorgan ist aber der von James Watt angegebene Flachschieber. Er ist muschelförmig hohl und wird durch einen passenden Antrieb (mittels Exzenters) von der Welle aus hin und her bewegt, so, daß er in der Hubmitte ist, wenn die Maschinenkurbel im Totpunkte steht. Zu dieser Zeit — die Abbildung ist etwa so gezeichnet — sind beide Zylinderseiten abgesperrt. Sowie aber die Maschinenkurbel sich noch etwas in der Pfeilrichtung dreht, wird der Schieber sich nach links bewegen, und dadurch wird die rechte Zylinderseite mit dem Einlaß, die linke Zylinderseite mit dem Auslaß in Verbindung gesetzt werden. Die rechte erhält Druckwasser, aus der linken kann das verbrauchte Wasser austreten — wie es sein muß. Ist die Kurbel im anderen Totpunkt angelangt, so wird der Schieber sich wieder in seine Mittellage zurückbewegt haben; er wird nach der anderen Seite öffnen, sobald er sich nach rechts bewegt.

Solche Maschine kann mit Druckwasser genau so betrieben werden, wie sie mit Dampf betrieben wird. Eine Schwierigkeit liegt nur darin, daß die Steuerung eine sehr genaue sein muß, weil Wasser nicht elastisch ist, und daß daher bei kleinen Fehlern in der Steuerung Schläge eintreten. Vor allen Dingen aber ist es schwierig, die Maschine gut zu regeln. Es muß auf alle Fälle der Zylinder mit Wasser ganz gefüllt werden, und daher wird immer gleich viel Wasser verbraucht, auch wenn man nicht die volle Arbeit von der Maschine verlangt. Bei Dampf gestaltet sich beides bequemer, indem man wegen der elastischen Eigenschaften des Dampfes den Zylinder nach Bedarf mehr oder weniger füllen kann. Die Schwierigkeit einer Regelung, zumal einer ökonomischen, war es denn auch hauptsächlich, die das Emporkommen der Wassersäulenmaschine verhindert hat. Versuche, etwa den Radius der Kurbel und damit den Hub des Kolbens verstellbar zu machen, führen auf plumpe und dabei unzuverlässige Konstruktionen.

DREHMOMENT UND LEISTUNG. Wir können am Beispiel des Peltonrades gleich noch zweierlei besprechen, nämlich erstens die Frage, wie denn in solchen Fällen die Berechnung mechanischer Arbeit zu erfolgen habe, wo es sich nicht um eine fortschreitende Bewegung handelt, sondern um eine drehende. Und zweitens läßt sich gerade am Peltonrad zeigen, daß es ganz von der zweckmäßigen Wahl der Verhältnisse im besonderen Falle abhängt, ob eine Umsetzung der Energie in dem

Sinne stattfindet, den wir wünschen, oder ob nicht; ganz von der Wahl zweckmäßiger Betriebsverhältnisse hängt der Wirkungsgrad des Peltonrades wie jeder Maschine ab.

In Abbildung 16 sahen wir die genauere Einrichtung des Peltonrades. Die Düse steht senkrecht; der Wasserstrahl trifft auf den Schaufelkranz. Jede der Schaufeln hat eine eigentümliche Gestalt, die man als doppelt-becherförmig bezeichnen kann. Der Wasserstrahl wird durch die mittlere Schneide geteilt, aus seiner Richtung abgelenkt und um 180° umgebogen. Die Umsetzung der kinetischen Energie des Strahls in mechanische Arbeit erfolgt dadurch, daß bei der Ablenkung der Strahl eine Kraft auf die Schaufeln ausübt und die Schaufeln vorwärtstreibt. Dabei wird dem ganzen Radkranz eine drehende Bewegung erteilt.

Nehmen wir etwa an, die auf die gerade beaufschlagte Schaufel ausgeübte Kraft betrage 50 kg, und der Abstand der Schaufeln von der Radachse betrage 25 cm. Dann ist für die Verdrehung der Welle, nach dem Hebelgesetz, das Produkt aus Kraft und Arm maßgebend; diese im Maschinenbetrieb wichtige Größe bezeichnet man als das Drehmoment der Maschine. Unser Peltonrad erfährt ein Drehmoment von $0{,}25 \times 50 = 12{,}5$ m-kg.* Bei einem Umlauf des Rades nimmt nun unser Schaufelkranz eine Arbeit auf, die durch das Produkt aus Kraft und Weg gegeben ist, die also $50 \times (0{,}25 \times 2\pi)$ m-kg beträgt. Die bei einem Umlauf gelieferte Arbeit ist also, und zwar bei jeder Maschine, gleich dem mit 2π multiplizierten Drehmoment M. Und da diese Arbeit in der Sekunde so oft geliefert wird, wie Umläufe in der Sekunde gemacht werden, also $\frac{n}{60}$ mal, wenn wir die minutliche Umlaufzahl mit n bezeichnen, so ist die Leistung der Maschine

$$N = \frac{2\pi}{60 \times 75} \times M \times n = \frac{1}{716} M \times n.$$

Die 75 im Nenner dient dazu, die Leistung in Pferdestärken umzurechnen.

Das von einer Maschine geleistete Drehmoment ist nun auch eine wichtige Eigenschaft derselben, fast so wichtig wie die Leistung. Ein einfaches Mittel, um das von einer Maschine ausgeübte Drehmoment durch den Versuch zu bestimmen, ist der Pronysche Zaum. Er dient dazu, die Leistung der Maschine zu bestimmen, indem man sie abbremst. Die vernichtete Arbeit wird in Wärme verwandelt.

Abbildung 22 zeigt einen Zaum, der auf die Welle des schon in Abbildung 16 dargestellten Peltonrades aufgesetzt ist, um es abzubremsen. Der Zaum besteht aus einem einfachen Balken, oft aus Holz, der auf die Riemenscheibe gesetzt ist und fest gegen sie gepreßt wird durch ein Band, das um die untere Radhälfte läuft und mit Hilfe der beiden kleinen Handräder S nachgezogen werden kann. Je stärker man die Handräder anspannt, desto größer wird die Reibung am Umfang der Bremsscheibe, und ein desto größeres Drehmoment hat die Maschine zu überwinden. Es kommt hierbei auf das Drehmoment an, denn man wird leicht erkennen, daß man das gleiche in bezug auf die Maschinenwelle und auf den Gang der Maschine erreicht, wenn man an einer großen Scheibe eine kleine Kraft reibend angreifen läßt, wie wenn man an einer kleinen Scheibe entsprechend stärker bremst. Es kommt auf das Produkt an aus reibender Kraft und dem Scheibenradius als dem Abstand, an dem die Kraft angreift.

---

* Wenn man das Drehmoment in Meterkilogramm angibt, ebenso wie die Arbeit, so sind deshalb Drehmoment und Arbeit nicht etwa gleichartige Größen.

Nun kann man aber das Drehmoment, das infolge der Reibung Maschine und Zaum wechselseitig aufeinander ausüben, dadurch messen, daß man das Ende des Bremshebels auf eine Brückenwage W drücken läßt und durch Wiegen feststellt, wie groß augenblicklich die Kraft ist, die am Ende des Hebels angreift und ihn hindert, sich mit der Maschine zu drehen. Messen wir etwa am Ende des Hebels eine Kraft von 10 kg, und ist die Länge des Hebels 1,25 m, so wüßten wir durch diese Messung, daß das Peltonrad ein Drehmoment von 12,5 m-kg überwindet.

Um die Leistung des Rades zu kennen, müßten wir noch die Umlaufzahl bestimmen, die wieder 600 sei, woraus denn die Bremsleistung sich zu $\frac{12{,}5 \times 600}{716} = 10\,\text{PS}$ berechnen würde.

Wir wollen nun folgenden Versuch angestellt denken. Es werde das Drehmoment, das der Bewegung des Peltonrades widersteht und das es also überwinden muß, allmählich verändert, indem wir durch Bedienen der Handräder S die Bremse mehr

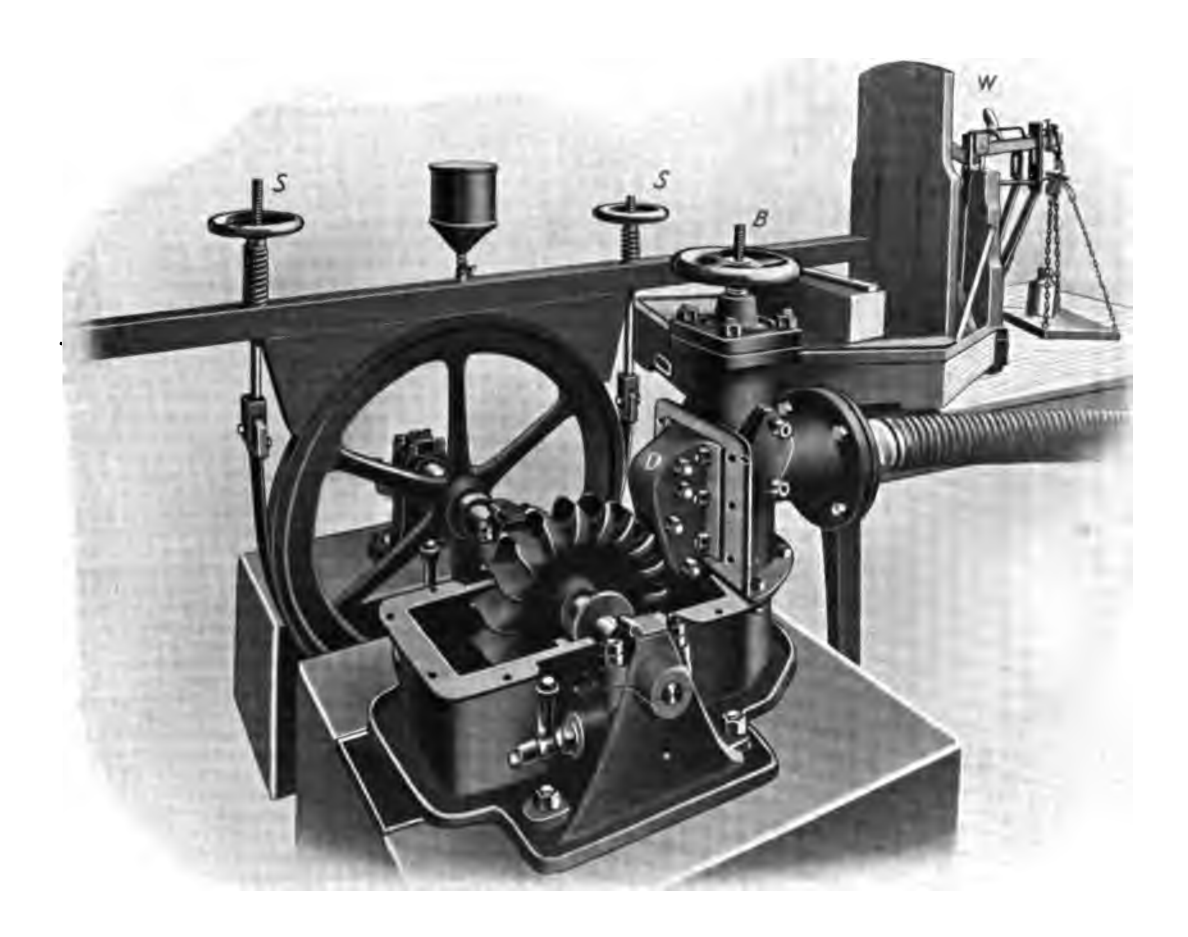


Abbildung 22. Peltonrad mit aufgesetztem Pronyschen Zaum.
Das Wasser kommt von rechts und trifft durch die Düse D senkrecht tangential aufs Rad. Zwischen den Spannschrauben S ein Behälter für Seifenwasser zum Schmieren und Kühlen.

und mehr anspannen. Dadurch verändert sich die Reibung, also das auf die Welle des Peltonrades ausgeübte Drehmoment, das wir ja jederzeit mittels der Wage messen können. Was wird das Peltonrad bei dieser Versuchsreihe tun?

Wenn wir zunächst das Bremsband so fest wie nur möglich anziehen, so werden wir es dahin bringen können, daß der Motor gar nicht mehr umläuft: er ist festgebremst. Das Drehmoment, das wir nun messen, ist das „Anlaufmoment", dasjenige, das der Motor beim Ingangsetzen ausüben kann. Wenn wir die Bremse lösen, wird der Motor zu laufen anfangen, und um so schneller laufen, je weniger Widerstand durch die Reibung ihm dargeboten wird, je kleiner also das Drehmoment ist, das er überwinden muß und das wir ja mit der Wage messen können. Wir können ihn mehr und mehr entlasten und ihn schließlich ganz freigeben, indem wir die Handräder ganz lösen oder sogar den Zaum abnehmen. Der Motor wird dann seine höchste, die sogenannte „Freilauftourenzahl" annehmen.

In dem Maße also, wie wir das belastende Moment vom Anlaufmoment auf Null vermindern, wird die Umlaufzahl von Null auf die Freilauftourenzahl steigen. Es wird sich also beim Versuch zwischen den beiden charakteristischen Größen, dem Drehmoment und der Umlaufzahl, eine Beziehung ergeben, wie sie durch Abbild. 23 dargestellt ist. In dieser Abbildung ist das erzielbare Drehmoment als abhängig von der Umlaufzahl aufgetragen, und es ergibt sich aus den eben angestellten Betrachtungen, da wir ja die Punkte A und B festgelegt haben, der wesentliche Verlauf der Beziehung. Ob der Verlauf allerdings genau geradlinig ist, wie wir es in der Abbildung angenommen haben, ist nicht sicher; oft ist es annähernd der Fall.

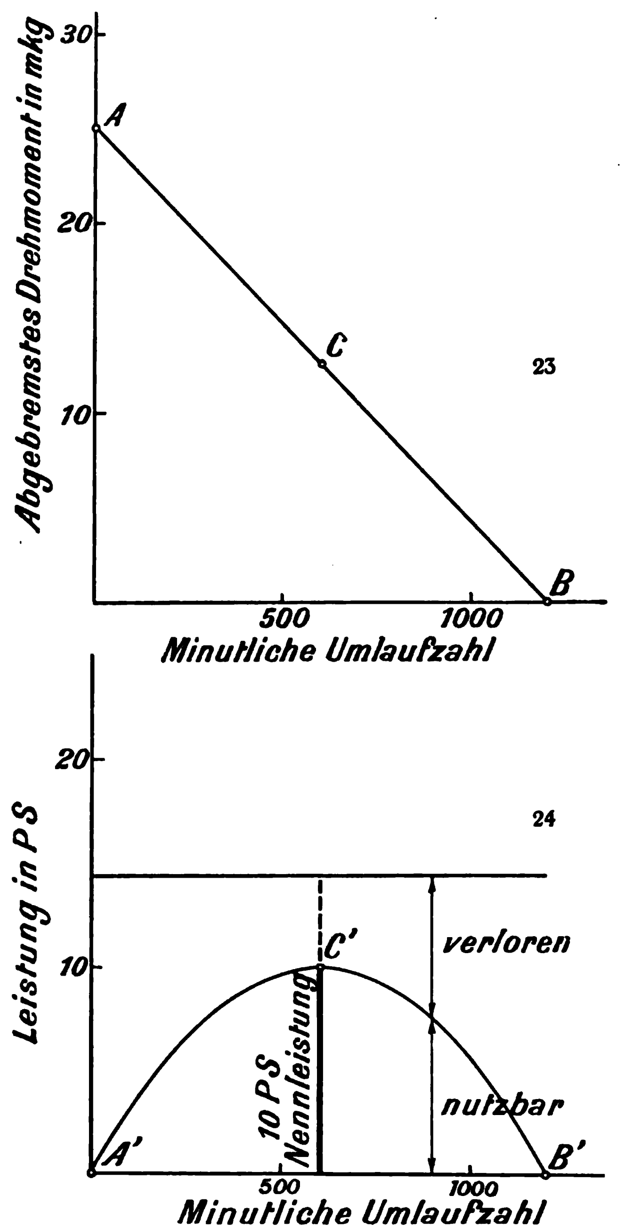


Abbildung 23 u. 24. Verhalten eines Peltonrades (einer Kreiselradmaschine) bei Änderungen des von ihr verlangten Drehmoments und der Leistung.

Wie ändert sich nun die Leistung der Maschine unter diesen wechselnden Verhältnissen? Wir erinnern uns, daß die Leistung proportional dem Produkt aus Dreh-

moment und Umlaufzahl ist. Daraus folgt, daß wir keine Leistung aus der Maschine ziehen sowohl im Punkt A wie auch im Punkt B, denn das Produkt wird Null, wenn einer seiner beiden Faktoren Null ist. Bei mittleren Umlaufzahlen indessen hat sowohl das Drehmoment als auch die Umlaufzahl endliche Werte, so daß sich auch für die Leistung solche ergeben. Bei wechselnden Umlaufzahlen werden wir also Leistungen aus dem Rade ziehen, die durch eine Kurve vom Charakter der Abbildung 24 dargestellt werden. Die Kurve muß nach beiden Seiten abfallen, dazwischen bei C′ einen Höchstwert haben. Nebenbei sei erwähnt, daß die Kurve eine Parabel ist, wenn die Linie AB der Abbildung 23 eine Gerade war.

Demnach gibt es für das Peltonrad eine bestimmte Umlaufzahl, bei der es am günstigsten arbeitet. Denn die Kurve Abbildung 24 gibt zugleich den Verlauf des Wirkungsgrades an, da ja die mit dem Wasser zugeführte Energie durch die Änderungen der Umlaufzahl nicht beeinflußt werden kann: unter allen Umständen wird die gleiche Wassermenge mit der gleichen Geschwindigkeit aus der Düse austreten, wenn wir nicht etwa künstlich oder durch den Einfluß eines Reglers nachgeregelt haben.

Ein wie großer Teil der kinetischen Energie, die dem aus der Düse tretenden Wasserstrahl innewohnt, in mechanische Arbeit verwandelt wird, hängt also von der Umlaufzahl des Rades ab. Denken wir an die beiden Grenzfälle. Zunächst wenn das Rad festgebremst ist, wird der aus der Düse austretende Wasserstrahl von den Schaufeln abgelenkt werden und seine Richtung um etwa 180° verändern, an Geschwindigkeit aber kaum einbüßen. Sein Inhalt an kinetischer Energie ist beim Austritt aus dem Rade unverändert, und so kann das Rad keine Energie aufgenommen haben. Anderseits wird der Fall des Freilaufs dann eintreten, wenn der Schaufelkranz dieselbe Geschwindigkeit wie der Wasserstrahl hat. Wenn aber Wasser und Kranz sich mit gleicher Geschwindigkeit in gleicher Richtung bewegen, können sie aufeinander nicht einwirken, wieder wird das Wasser die anfängliche Geschwindigkeit unverändert beibehalten und daher keine Energie ans Rad abgeben. Wenn dagegen das Rad weder stillsteht noch sich mit der Geschwindigkeit des Wassers vorwärtsbewegt, so kann es offenbar dahin kommen, daß das Wasser weder mit einer rückwärtsgerichteten Geschwindigkeit, wie im ersten Falle, noch mit einer vorwärtsgerichteten Geschwindigkeit, wie im zweiten Falle, das Rad verläßt, sondern durch den Widerstand des Rades gerade zum Stillstand gebracht wird und ohne Geschwindigkeit zu Boden fällt. In diesem günstigsten Falle hat das Wasser alle Geschwindigkeit verloren und daher, abgesehen von einigen unvermeidlichen Verlusten, seine ganze Energie an das Rad abgegeben. Man sieht, daß man die Verhältnisse sorgfältig abwägen muß, um die Energieumwandlung in dem Sinne und mit der Vollkommenheit vonstatten gehen zu lassen, wie man es wünscht.

Um also beim Peltonrad einen guten Wirkungsgrad zu bekommen, muß man es mit einer passenden Umfangsgeschwindigkeit laufen lassen, die etwa halb so groß sein muß wie die Geschwindigkeit des auf das Rad treffenden Wasserstrahls.

Im allgemeinen steht uns bei Neuerrichtung einer Wasserkraftanlage ein bestimmtes, durch die örtlichen Verhältnisse gegebenes Gefälle zur Verfügung. Diesem Gefälle entsprechend liegt die Austrittsgeschwindigkeit des Wasserstrahls aus der Düse des Peltonrades ohne weiteres fest. Da die gute Ausnutzung der im Wasserstrahl steckenden Geschwindigkeitsenergie von der Innehaltung einer Umfangsgeschwindigkeit des Schaufelkranzes gleich etwa der halben Strahlgeschwindigkeit abhängt, so liegt also auch die Umfangsgeschwindigkeit des Schaufelkranzes allein nach den örtlichen Geländeverhältnissen vollkommen fest.

Bei einem Gefälle H Meter wird der Wasserstrahl fast die zugehörige Endgeschwindigkeit des freien Falles $\sqrt{2gH}$ annehmen, und die Umfangsgeschwindigkeit des Rades müßte annähernd $\frac{1}{2}\sqrt{2gH}$ sein.

Die vorgeschriebene bestimmte Geschwindigkeit des Schaufelkranzes wird nun erreicht durch passende Wahl von Raddurchmesser und Umlaufzahl, und zwar: je kleiner der Durchmesser, desto größer muß die Umlaufzahl sein — je kleiner man die Umlaufzahl haben will, desto größer muß der Raddurchmesser sein. Man erhält also kleine Abmessungen eines neu zu erbauenden Rades, wenn man es mit hoher Tourenzahl laufen läßt.

Das führt uns auf eine andere Tatsache, die nicht unerwähnt bleiben soll. Allgemein nämlich läßt sich eine Maschine auf zweierlei Weise so bauen, daß sie eine bestimmte Leistung — die ja immer von ihr verlangt wird — hergibt; wobei natürlich bei einer Wasserkraftanlage vorausgesetzt werden muß, daß die Wasserkraft an sich nach Menge und Gefälle zur Hergabe der Leistung ausreicht. Da die Leistung einer Maschine durch das Produkt des Drehmoments und der Umlaufzahl gegeben ist, so kann man entweder das Drehmoment vergrößern oder aber die Umlaufzahl. Das von einer Maschine auszuübende höchste Drehmoment* hängt wie beim Peltonrad so auch im allgemeinen von den Abmessungen der Maschine ab. Eine Dampfmaschine gibt an ihre Welle um so größere Drehmomente ab, je größer der Zylinderdurchmesser oder je größer ihr Kurbelradius ist, kurzum: also je größer die Maschinenabmessungen sind. Daß man die Leistung einer Maschine vergrößern kann, indem man ihre Abmessungen vergrößert, sie größer baut, ist nicht erstaunlich. Weniger liegt es auf der Hand, daß man eben nicht nur nach den äußeren Abmessungen der Maschine gehen darf, sondern ihre Umlaufzahl in Betracht ziehen muß, will man ihre Leistung abschätzen. Von den äußeren Abmessungen hängt eben nur das Drehmoment ab. Lehrreich ist in dieser Hinsicht Abbildung 20 (S. 30), die das große, langsam laufende Wasserrad der Insel Man und zum Vergleich (oben rechts) ein Peltonrad gleicher Leistung zeigt, das viel schneller läuft und daher äußerlich so viel kleiner erscheint. Andere Beispiele sind die Dampfturbinen, deren geringen Raumbedarf gegenüber Kolbendampfmaschinen man oft rühmen hört: er beruht auf der hohen Umlaufzahl — meist 3000 in der Minute gegenüber meist nur 100, nie über 500, bei Kolbenmaschinen. Und auch der Automobilmotor sei genannt, der, auf kleinem Raum untergebracht, mit seinen 1200 oder 1500 Umläufen minutlich 10 oder 20 PS liefert, während ein ortfester Benzinmotor nur etwa 200 Umläufe macht und daher bei gleicher Leistung eine beträchtliche Größe hat.

Man könnte meinen, die Steigerung der Umlaufzahl sei ein bequemes Mittel, um kleine und daher, wegen geringen Aufwandes an Material und an Transportkosten, billige Maschinen zu erhalten. Immerhin ist aber zu bedenken, daß mit wachsender Umlaufzahl unter gleichen Umständen ein größerer Verschleiß eintritt. So haben denn schnellaufende Maschinen geringere Lebensdauer; zudem sind sie meist empfindlicher für Zufälligkeiten, weil die kleinen, oft betätigten Organe leichter versagen. Durch höhere Abschreibungsquoten, frühere Erneuerung, häufigere Betriebsstörung und meist auch noch durch höheren Brennstoffverbrauch werden daher die Minderkosten schnellaufender Maschinentypen reichlich aufgewogen, und man geht nur da gern auf hohe Umlaufzahlen, wo die Verminderung des Maschinengewichts besonders wichtig ist — bei Torpedobooten, Automobilen, Flugzeugen.

* Wir vergleichen jetzt mehrere Maschinen verschiedener Größe miteinander, deren jede unter günstigsten Verhältnissen arbeitet, und sprechen nicht mehr vom Verhalten einer Maschine bei wechselnder Umlaufzahl.

Die Tatsache, daß man durch Wahl einer hohen Umlaufzahl die Größe einer Maschine, freilich auf Kosten der Lebensdauer, herabdrücken kann, gilt recht allgemein, und zwar für rein umlaufende sog. Kreiselradmaschinen wie auch für Kolbenmaschinen. Im Verhalten einer bestimmten Maschine bei wechselnder Umlaufzahl indessen zeigt sich ein bemerkenswerter Unterschied zwischen den Kreiselrad- und den Kolbenmaschinen.

Wir wollen den gleichen Versuch, wie früher für das Peltonrad beschrieben, auch mit einer Kolbenmaschine angestellt denken, etwa mit einer Wassersäulenmaschine, wie wir sie an Abbildung 21 erläuterten. Auch eine solche Maschine kann man mittels Zaumes bremsen und dadurch ihre „Nutzleistung" feststellen. Wenn man wieder die Maschine zunächst festbremst, dann den Zaum mehr und mehr löst, bis schließlich die Maschine im Freilauf läuft, so würde man Ähnliches finden wie bei der umlaufenden Maschine: wieder würde das Drehmoment mit zunehmender Umlaufzahl abnehmen. An sich allerdings wird bei der Kolbenmaschine, in der ja bei allen Geschwindigkeiten der gleiche Wasserdruck auf die gleiche Kolbenfläche wirkt, und bei der der Kolben stets den gleichen Hub zurücklegt, auch immer das gleiche (mittlere) Drehmoment freiwerden müssen, wie schnell auch die Maschine läuft: so könnte man erwarten, daß die Maschine stets das gleiche Drehmoment zu liefern imstande sei. Die Abnahme des Drehmoments aber rührt davon her, daß, je schneller die Maschine läuft, desto schneller auch das Wasser in den Zylinder hinein und aus ihm heraus durch verhältnismäßig enge und gewundene Kanäle hindurchgehen muß, wobei Druckverluste entstehen. Steht also auch bei allen Umlaufzahlen der gleiche Druck zur Verfügung, so wird doch bei höherer Umlaufzahl, wegen der Drosselverluste in den Kanälen, nur ein kleinerer Druck im Zylinder wirksam sein. Daher nimmt das Drehmoment auch bei der Kolbenmaschine mit wachsender Umlaufzahl ab.

In Abbildung 25 ist wieder die Abhängigkeit des Drehmoments von der Umlaufzahl unter der Annahme dargestellt, der Verlauf der Beziehung sei durch eine gerade Linie gegeben, was bisweilen einigermaßen zutrifft. Dann wird, wie bei der Wasserturbine, die Leistung bei mittlerer Umlaufzahl einen Höchstwert erreichen (Abbildung 26). Bis hierher scheinen sich beide Maschinenarten ganz gleich zu verhalten.

Nun aber ist ein wesentlicher Unterschied der folgende. Das Peltonrad verbrauchte, solange an der Düse nicht künstlich gestellt wurde, stets gleich viel Wasser, und die Höchstleistung der Maschine ergab zugleich den günstigsten Wirkungsgrad. Bei der Kolbenmaschine ist das anders. Sie verbraucht nicht immer gleich viel Wasser, sondern sie nimmt bei jedem Umlauf eine bestimmte Wassermenge auf, der Wasserverbrauch steigt also mit der Umlaufzahl und wird durch eine schräg ansteigende gerade Linie A'D dargestellt. Den charakteristischen Unterschied sieht man klar, wenn man an den Stillstand denkt: das Peltonrad läßt auch im festgebremsten Zustande Wasser durchlaufen, bei der Kolbenmaschine ist das Laufen Vorbedingung für das Hindurchgehen des Wassers. Nun erkennen wir leicht, daß von dem stets ansteigenden Verbrauch ein um so kleinerer Bruchteil nutzbar gemacht wird, je größer die Umlaufzahl ist: bei der Kolbenmaschine wird der Wirkungsgrad günstiger, wenn sie langsamer läuft, und insbesondere bei derjenigen Umlaufzahl, bei der sie die größte Leistung liefert, ist ihr Wirkungsgrad schon recht ungünstig.

Um diesen ungünstigen Wirkungsgrad zu vermeiden, pflegt man Kolbenmaschinen viel langsamer laufen zu lassen, als ihrer höchsten Leistung entsprechen würde; man pflegt auf größtmögliche Leistung zugunsten guten Wirkungsgrades zu verzichten. Man würde die Maschine, deren Eigenschaften durch Abbildung 26 dargestellt sind, etwa

auch als eine 10pferdige Maschine bezeichnen, wie es beim Peltonrad der Fall war (Abbildung 24). Nimmt man bei beiden Maschinen 10 PS entsprechend dem Punkt C'

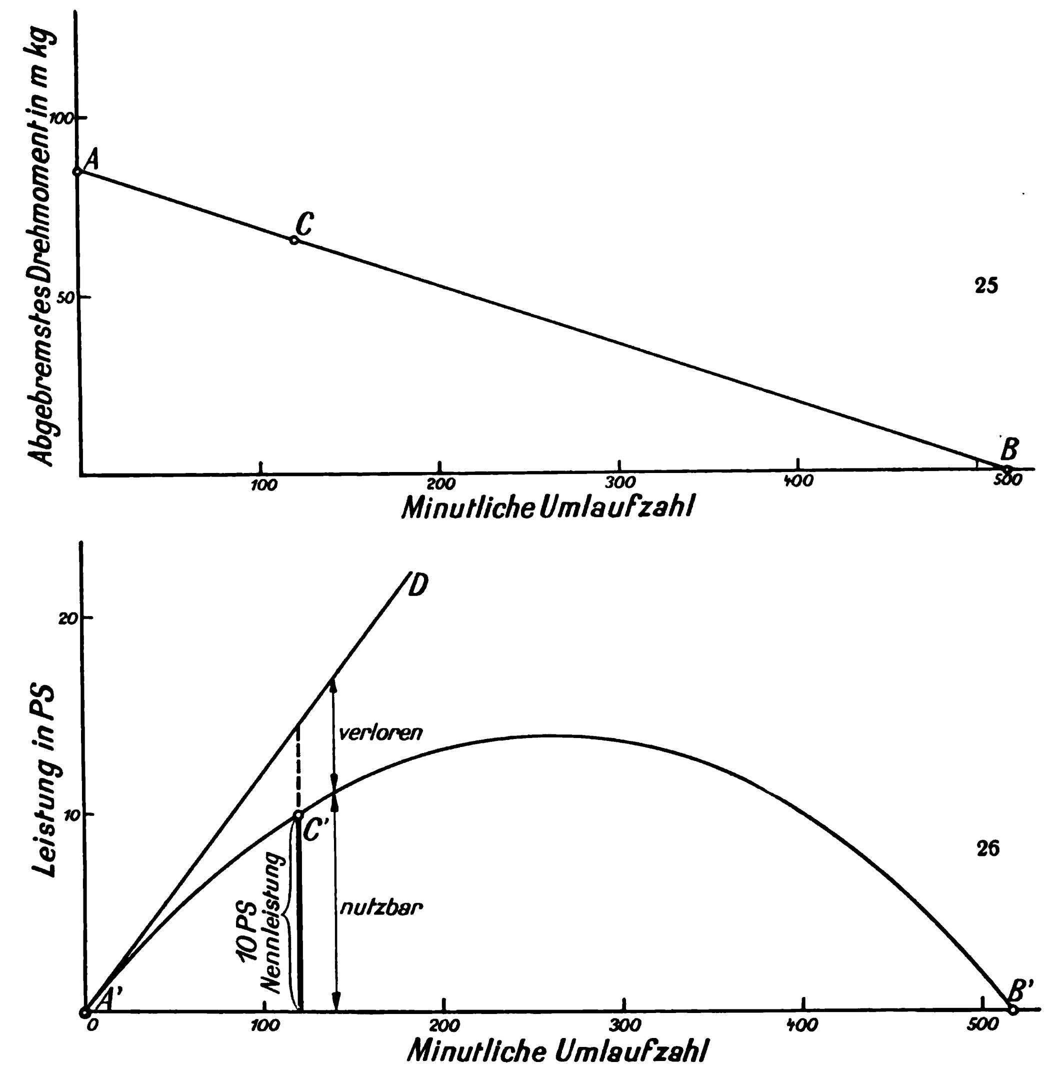


Abbildung 25 u. 26. Verhalten einer Kolbenmaschine bei Änderungen des von ihr verlangten Drehmoments und der Leistung.

als Nennleistung an, so wird sich als charakteristischer Unterschied beider Maschinenarten ergeben, daß die Kolbenmaschine eine Erhöhung ihrer Leistung durch Erhöhung der Umlaufzahl, allerdings auf Kosten des Wirkungsgrades, zuläßt, die Kreiselmaschine aber nicht.

Und ein weiterer Unterschied zwischen beiden Maschinenarten ist aus dem Vergleich der Linien zu erkennen, die den Verlauf des Drehmoments angeben. Während das Peltonrad beim Ingangkommen, also für sehr kleine Umlaufzahlen, ein Drehmoment zur Verfügung stellte, das etwa das Doppelte des normalen Drehmoments ist, ist das Anlaufmoment der Kolbenmaschine nur wenig größer als dasjenige im

vollen Lauf; man vergleiche die Lage der Punkte A und C gegeneinander in Abbildung 23 und 25.

Für etwa notwendige Vergrößerungen des von einer Maschine zu versorgenden Betriebes ist die Eigenschaft der Kolbenmaschine, durch einfache Erhöhung der Umlaufzahl mehr Leistung herzugeben, oft wertvoll. In manchen Fällen wieder ist es wichtig, ein großes Anlaufmoment zur Verfügung zu haben, für alle Maschinen nämlich, die oft in Gang gebracht oder umgesteuert werden müssen. Warum übrigens Dampfmaschinen durch Füllungsvergrößerung — nicht aber andere Kolbenmaschinen — doch oft eine künstliche Vergrößerung des Anlaufmoments zulassen, werden wir später sehen. Je nach Umständen werden also die eben geschilderten Verhältnisse zugunsten der einen oder der anderen Maschinengattung in die Wage fallen, und die Eigenschaften der verschiedenen Maschinenarten, die hier nur kurz gestreift werden konnten, sind bei Neubeschaffungen von sachkundiger Seite sorgsam gegeneinander abzuwägen. Es kommt nicht nur auf den geringen Brennstoffverbrauch an.

Natürlich ist eine Leistungssteigerung durch Erhöhung der Umlaufzahl immer mit Vorsicht vorzunehmen, da ja mit zunehmender Umlaufzahl Gefahren entstehen können, insbesondere infolge der Massenwirkung hin und her gehender Teile und durch die Schwungkraft umlaufender Teile. So wird ein Schwungrad oder eine Riemenscheibe bei gesteigerter Umlaufzahl schließlich durch die Zentrifugalkraft zersprengt werden, und die Stücke können gewaltigen Schaden anrichten: Schwungradexplosionen gehören zu den gefürchtetsten Unglücksfällen der Maschinentechnik.

VERHALTEN DER LUFT UND ANDERER GASE. Um die Wirkungsweise der Dampf- und Gasmaschine zu verstehen, müssen wir zunächst das Verhalten der Gase und der ihnen ähnlichen Dämpfe bezüglich der Arbeitsleistung kennen lernen. Wir können uns auch ihr Verhalten am einfachsten mit Hilfe des uns schon geläufigen Kraft-Weg-Diagramms veranschaulichen, etwa an Hand von Abbildung 27 u. 28.

Abbildung 27 stellt den Schnitt durch einen kreisrunden Zylinder dar, der gerade 1 qm Querschnittfläche haben möge, in dem sich ein Kolben luftdicht bewegen läßt. Der Zylinder ist links geschlossen, rechts aber offen. (Der dünne Strich rechts stellt wie immer nur die Kante dar, die man hinter der Bildebene sieht.) In irgendeiner Stellung des Kolbens, etwa wenn in A′ der Kolben 1 m vom Ende entfernt ist und daher 1 Kubikmeter Luft abschließt, haben wir durch einen Hahn H Luft in den Zylinder gelassen und ihn dann geschlossen. Die Spannung der Luft im Zylinder wäre dann gerade gleich der Atmosphärenspannung, das heißt, sie betrüge — freilich nach dem Barometerstand wechselnd — im Durchschnitt etwa 1 kg auf jedes Quadratzentimeter Fläche oder 10000 kg auf das Quadratmeter Fläche, das der Kolben darstellt. Dieser Druck von 1 Atm. oder diese Kraft von 10000 kg wirkt aber von beiden Seiten auf den Kolben, daher erfährt der Kolben im ganzen keine Kraft und bewegt sich nicht.

Wir denken uns den Kolben nun verschoben, einmal einwärts bis zur Stellung B′, einmal auswärts bis zur Stellung C′. Dabei wird auf die äußere Kolbenseite immer gleichmäßig der Luftdruck von 1 Atm. und daher (bei 1 qm Kolbenfläche) die Kraft von 10000 kg wirken. Dieser unveränderte Druck wird in Abbildung 28 durch den Abstand der wagerechten Geraden B_1C_1 von der Achse OV dargestellt, also durch den Abstand $B_1B_2 = AA_2 = C_1C_2$. Diese Kraft drückt stets gleichmäßig von außen auf den Kolben; der Druck des innen abgeschlossenen Gases aber ändert sich bei der Bewegung des Kolbens, und daher ändert sich die auf den Kolben von innen her wirkende Kraft: beide steigen, wenn der Kolben nach innen geht, wenn also das Volumen der abgeschlossenen Luft verringert wird; bei der entgegengesetzten Be-

wegung sinkt der Druck der abgeschlossenen Luft. Das Ansteigen des Druckes beim Einwärtsgang des Kolbens möge nach der Kurve AB erfolgen; im Punkte B ist das Volumen OB_2 der Luft auf die Hälfte des ursprünglichen vermindert, dabei hat sich der Druck der Luft auf das Doppelte vermehrt; er beträgt dort 2 Atmosphären und die Kraft auf den Kolben 20000 kg. Anderseits ist beim Auswärtsgang des Kolbens der Druck auf ein Viertel des früheren, auf $C_2C = {}^1/_4$ Atm., gefallen, wenn das Volumen der Luft sich auf das Vierfache vermehrt hatte. Die Kraft beträgt nun 2500 kg, die der Kolben von innen her erfährt. Wenn wir in dieser Weise annehmen, der Druck der abgeschlossenen Luft sei umgekehrt proportional dem Volumen, die Kurve BAC sei also nach mathematischen Gesetzen eine gleichseitige Hyperbel, so trifft das nur dann genau zu, wenn die Luft keine Temperaturveränderungen erleidet. In Wahrheit würde die Luft sich freilich bei der Kompression erwärmen, bei der Ausdehnung abkühlen, und dann würde die Kurve BAC etwas anders verlaufen, immerhin aber nach rechts abfallen.

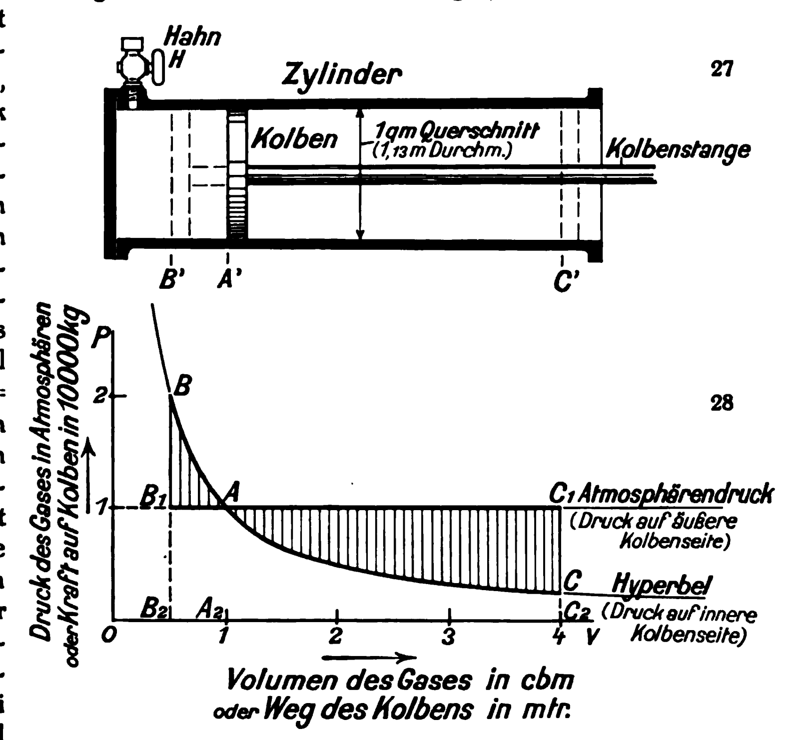


Abbildung 27 und 28. Zylinder mit Kolben und Kraft-Weg-Diagramm für die Luft im Zylinder.

Es wirken also von beiden Seiten Kräfte auf den Kolben; dieselben heben sich teilweise auf, und nach außen wird nur so viel frei, um wieviel die eine der Kräfte überwiegt. Einwärts vom Punkte A überwiegt die innere Kraft um die Strecken, die durch die senkrechte Schraffur gekennzeichnet sind; auswärts von A überwiegt der äußere Luftdruck um die ebenso kenntlich gemachten Strecken.

Das ganze Diagramm Abbildung 28 ist nun aber wieder ein Kraft-Weg-Diagramm. Denn die Volumen-Zu- und -Abnahmen stellen doch zugleich die Wege dar, die der Kolben zurücklegt, und die Drucke geben — je nach der Kolbengröße in verschiedenem Maßstab — die auf den Kolben wirkenden Kräfte an. Die Flächen sind also Arbeit. Das heißt also: um den Kolben von A′ nach B′ zu drücken, müssen wir Arbeit in dem Betrage aufwenden, der der schraffierten Fläche ABB_1 entspricht; geht der Kolben von B′ nach A′ zurück, so gewinnen wir bei der Ausdehnung die Arbeit zurück, die wir bei der Kompression der Luft hatten aufwenden müssen. Beide Vorgänge brauchen nicht in einem Zylinder zu erfolgen: komprimiert man Luft, leitet die Preßluft in Rohrleitungen fort und führt sie Zylindern zu, in denen sie sich wieder

ausdehnt, so hat man eine Druckluft-Kraftübertragung, die zum Betriebe von Werkzeugen noch heute sehr beliebt ist, der Elektrotechnik zum Trotz. — Aber auch zum Herausziehen des Kolbens von A′ nach C′ ist Arbeit aufzuwenden, nämlich die Fläche ACC_1, und man gewinnt sie wieder, wenn der Kolben — oder ein anderer Kolben — zurückgesaugt wird. Saugluftkraftübertragungen sind freilich selten, höchstens an die Saugluftbremsen der Eisenbahnen kann erinnert werden, obwohl bei ihnen nicht gerade die Arbeitsübertragung die Hauptsache ist.

Wir können die Verhältnisse auch so darstellen: die auf den Kolben wirkende Kraft ist immer der Unterschied von dem, was von außen und was von innen auf ihn wirkt. Ebenso ist die bei der Bewegung des Kolbens freiwerdende mechanische Arbeit jederzeit der Unterschied von der Arbeit, die das Gas bei der Ausdehnung leistet, und jener Arbeit, die der äußere Luftdruck zum Zurückdrängen verbraucht — beim Einwärtsgang des Kolbens umgekehrt. Geht der Kolben von B′ über A′ nach C′, so nimmt der innere Druck dauernd ab. Die innere Luft leistet bei der Expansion dauernd Arbeit, die durch die Flächen zwischen BAC und der Achse OV gegeben ist, im ganzen die Arbeit BB_2C_2CAB. Die innere Luft leistet also dauernd Arbeit, wenn sie sich ausdehnt, aber ebenso dauernd wird Arbeit verbraucht zum Zurückdrängen der auf der anderen Kolbenseite lastenden Atmosphäre; dazu wird insgesamt die Rechteckfläche $B_1B_2C_2C_1B_1$ verbraucht. Wenn also auch ein Gas bei fortdauernder Ausdehnung mehr und mehr Arbeit leistet, so kann uns das doch zur

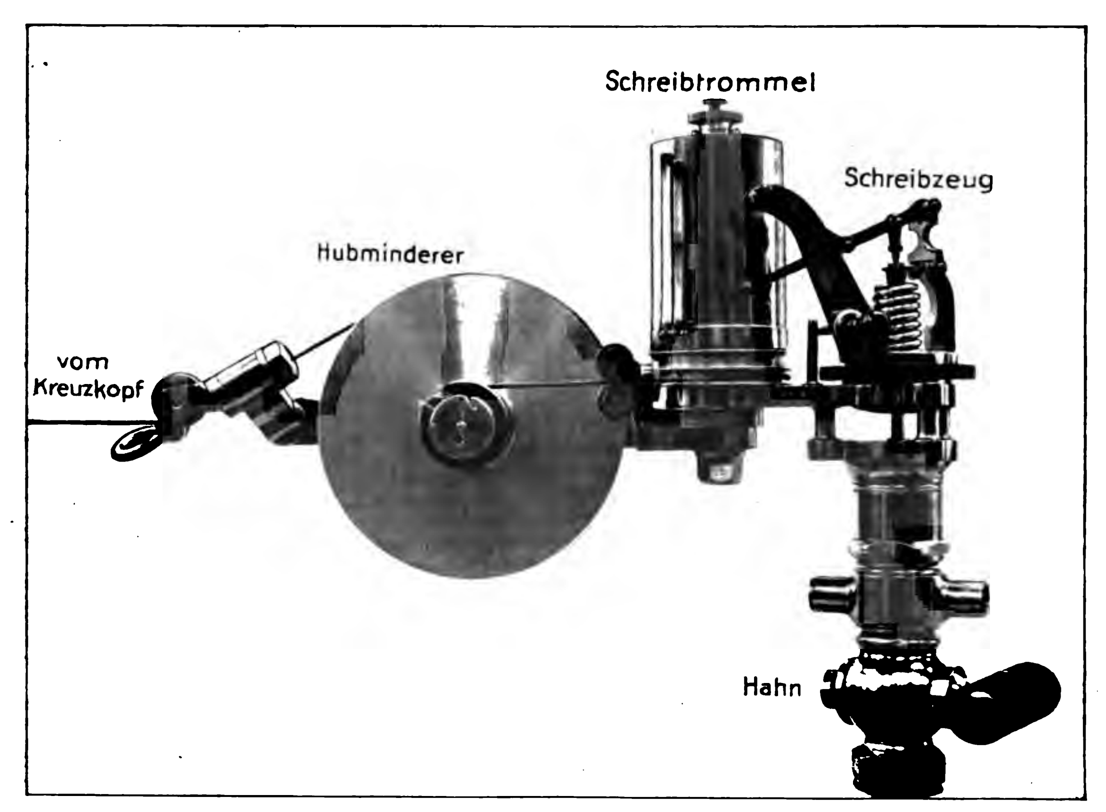
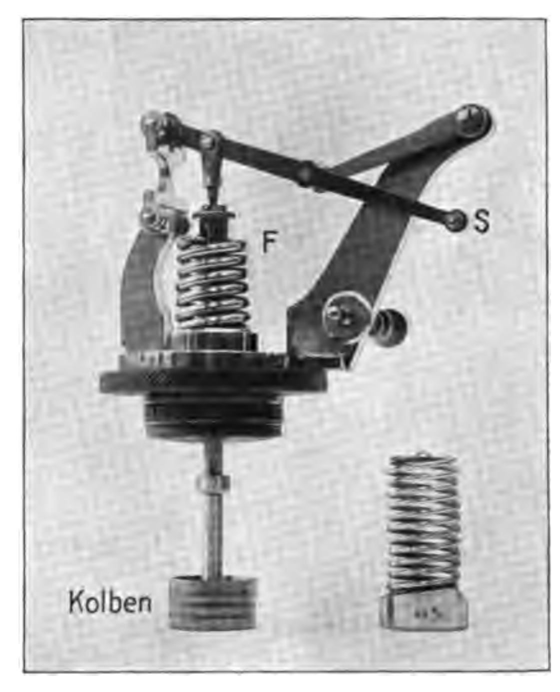


Abbildung 29. Indikator zum Untersuchen von Kolbenmaschinen, mit angesetztem Hubminderer. J. Maihak, Hamburg, und Dreyer, Rosenkranz & Droop, Hannover.

nutzbaren Arbeitslieferung nur so lange dienen, bis wir auf der Höhe des umgebenden Druckes angelangt sind; von da an verbrauchen wir mehr Arbeit zum Verdrängen der Atmosphäre, als wir anderseits gewinnen. Obwohl also ein Gas bei seiner Ausdehnung mehr und mehr Arbeit hergibt und einen unerschöpflichen Energievorrat darzustellen scheint, so ist doch, solange wir uns im lufterfüllten Raume befinden, immer nur so viel der Energie auszunutzen, wie bis zum Ausgleich seines Druckes gegen die Umgebung frei wird. Wir werden dadurch darauf aufmerksam, daß nicht jeder Energievorrat gänzlich ausnutzbar zu sein braucht.



Abbild. 30. Schreibzeug des Indikators Abbild. 29, herausgeschraubt. Daneben eine aus dem Schreibzeug herausgeschraubte Feder.

Praktisch stellt uns also eine bestimmte Menge von Luft oder eines anderen unter Druck befindlichen Gases nur eine beschränkte Arbeitsausbeute zur Verfügung. Um trotzdem dauernd Arbeit zu bekommen, müssen wir die begrenzte Luftmenge unter Zuhilfenahme der Wärme wieder und wieder den Ausdehnungsprozeß durchmachen lassen: wir müssen die Luft einen der thermischen Kreisprozesse machen lassen, auf die wir im nächsten Abschnitt eingehen werden.

Über die Art, wie das Gas — oder ein Dampf, der hinsichtlich der elastischen Eigenschaften ihm gleichsteht — im Zylinder, auf einen Kolben wirkend, Arbeit hergibt, gibt der Indikator Aufschluß. Dieses wichtige Instrument zum Untersuchen der Kolbenmaschinen möge an dieser Stelle beschrieben werden.

Einen Indikator neuerer Bauart zeigt Abbildung 29. Der Indikator wird so an der zu untersuchenden Maschine befestigt, wie Abbildung 31 es erkennen läßt. Abbildung 30 zeigt das sogenannte Schreibzeug des Indikators herausgeschraubt.

Der Indikator besteht aus einem kleinen (meist 2 cm weiten) Zylinder, in dessen Innerem der Kolben des Indikatorschreibzeugs leicht, aber dampfdicht sich bewegt. Das Innere des Indikatorzylinders steht mit dem Inneren des zu untersuchenden Maschinenzylinders in Verbindung, so daß auf die untere Fläche des Indikatorkolbens stets der im Maschinenzylinder herrschende Druck wirkt. Die beiden Innenräume können aber durch Abschließen des zwischen Maschine und Indikator geschraubten Hahnes voneinander getrennt werden. Bei geschlossenem Hahn kann man dann den Indikator ganz losschrauben (der Hahn bleibt an der Maschine, jedenfalls solange sie in Betrieb ist), ihn in den Reisekasten verpacken, der in Abbildung 31 rechts zu sehen ist, und ihn an eine andere Maschine anschrauben. Kolbenmaschinen werden mit durchbohrten Indikatorstutzen versehen, die den Zweck haben, die Indikatoren anzuschließen, und die wir auch in den Abbildungen 21 und 32 angegeben finden: jede Zylinderseite einer doppeltwirkenden Maschine hat einen solchen Stutzen.

Auf die untere Fläche des Indikatorkolbens wirkt stets der Druck, der im Innern

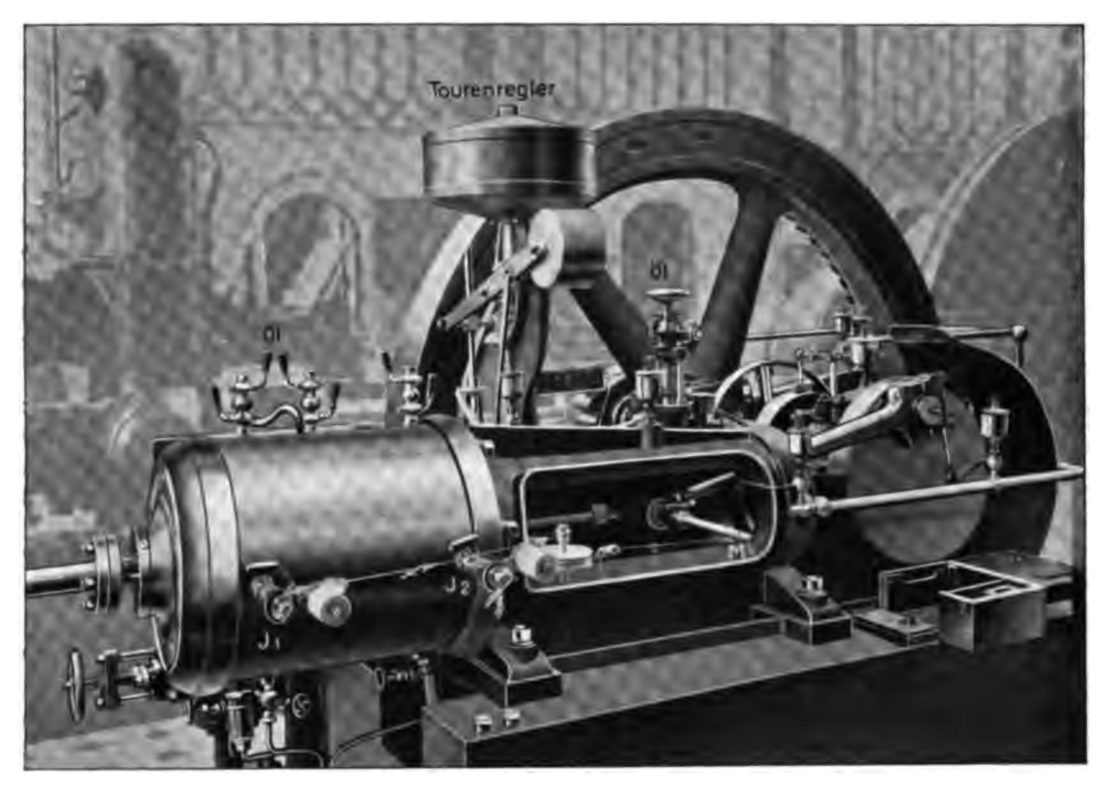
des Maschinenzylinders herrscht. Der Kolben streckt eine Feder F, die oben mit der Kolbenstange, unten mit dem Zylinderdeckel verschraubt ist, um so mehr, je größer der Druck ist, der auf ihn wirkt. Da die Bewegung des Kolbens durch ein Gestänge in vergrößertem Maßstabe auf einen Schreibstift S übertragen wird, der vor dem Papier einer Schreibtrommel spielt, so werden auf dieser Trommel senkrecht die Drucke aufgetragen werden, die im Zylinder der Maschine herrschen. Nun vollführt aber die Trommel des Indikators, die um die senkrechte Achse drehbar ist, eine Bewegung, die durch den Kolben der Maschine oder durch einen mit ihm in Verbindung stehenden Maschinenteil veranlaßt wird. In Abbildung 21 und 31 sieht man die Mitnehmer M, über die die Indikatorschnur gehängt wird. Meist muß noch ein Hubminderer zwischengesetzt werden, der die Wege des Maschinenkolbens so weit verkleinert, wie es der Hub der Indikatortrommel erfordert. Die Hubminderung findet durch zwei Rollen verschiedenen Durchmessers statt, deren Übersetzungsverhältnis überdies verändert werden kann, indem man die kleinere der Rollen auswechselt.

Wenn sich die Trommel des Indikators proportional dem Kolbenwege der zu indizierenden Maschine bewegt, so wird der Schreibstift auf dem auf der Trommel aufgespannten und mit zwei Klemmfedern gehaltenen Papier im wagerechten Sinne die vom Maschinenkolben zurückgelegten Wege antragen, während er doch im senkrechten Sinne die auf den Maschinenkolben wirkenden Kräfte verzeichnet. Es entsteht also im ganzen ein Kraft-Weg-Diagramm, dessen Fläche Arbeit darstellt.

Da die Spannung des Gases durch die Streckung der Feder F gemessen wird, so muß die Feder je nach der Höhe der vorkommenden Spannungen passend gewählt werden; sie ist deshalb auswechselbar, und man sieht eine zweite Feder in Abbildung 30 neben dem Schreibzeug stehen. Auf jeder Feder ist der „Federmaßstab" aufgestempelt: es ist angegeben, um wieviel Millimeter der Schreibstift S sich aufwärtsbewegt, wenn der Druck um eine Atmosphäre steigt. Man erkennt in Abbildung 30 die Stempelung: 45 mm. Diese Feder würde, da die ganze Höhe der Trommel etwa 100 mm beträgt, nur über etwa 2 Atmosphären Druck hin verwendbar sein. Die im Schreibzeug eingeschraubte Feder ist, wie man schon aus der Drahtstärke sieht, viel steifer, sie hat nur 5 mm Federmaßstab und kann daher zur Messung von Drucken bis zu 20 Atm. dienen.

Wenn wir diesen Indikator an den Hahn H des Zylinders Abbildung 27 anschlössen, so würde stets der Druck der inneren Luft in den Indikator treten, also würde sich der Schreibstift immer dem Druck entsprechend heben. Wenn wir dabei die Trommel durch eine Schnur von dem Kolben oder der Kolbenstange so antreiben lassen, daß sie sich entsprechend den Wegen des Kolbens dreht, daß sich also das Papier diesen Wegen entsprechend verschiebt, dann würden wir beim Bewegen des großen (nicht etwa des Indikator-) Kolbens die Hyperbel BAC auf dem Papier aufgezeichnet erhalten. Wir würden dann noch die atmosphärische Linie B_1C_1 auf dem Papier aufschreiben lassen, indem wir das Indikatorinnere mit der Außenluft verbinden und die Trommel dabei bewegen. Der Indikatorhahn ist gleich als Dreiwegehahn ausgebildet: schließt man ihn, so steht das Innere des Indikators mit der in Abbildung 29 vorn sichtbaren kleinen Bohrung des Hahns in Verbindung. Wir erhalten also in Gestalt der Flächen BAB_1 und CAC_1 direkt die Arbeit aufgezeichnet, die wir zum Bewegen des Kolbens aufwenden mußten oder die bei der Bewegung in der anderen Richtung frei wurde.

So ist der Indikator das wichtigste Mittel, um die von einer Kolbenmaschine gelieferte Arbeit oder, genauer gesagt, um diejenige Arbeit festzustellen, die der Dampf



Abbild. 31. Dampfmaschine mit angebauten Indikatoren, J_1 für die Deckelseite, J_2 für die Kurbelseite.

an den Maschinenkolben abgegeben hat und die man daher als indizierte Arbeit, gegebenenfalls als indizierte Leistung der Maschine bezeichnet. Er mißt aber nicht nur die Leistung, sondern gibt auch an, ob die Wirkung des arbeitenden Gases oder Dampfes die richtige ist, und läßt erkennen, was zu tun ist, um die Wirkung zu verbessern. Das soll an den Diagrammen der Abbildung 32 erläutert werden, die der Gestalt nach einer Dampfmaschine oder auch einer Druckluftmaschine entstammen können. Diese Maschinengattungen unterscheiden sich nur durch die Herkunft des im Maschinenzylinder zur Wirkung kommenden Druckes: bei der Dampfmaschine ist er durch Beheizen eines Dampfkessels entstanden, daher wird in ihr letzten Endes Wärme in Arbeit verwandelt; bei der Druckluftmaschine hingegen arbeitet die von einem Kompressor — einer Druckluftpumpe — erzeugte Druckluft. Bei der Druckluftmaschine wird also nur die von dem Kompressor verbrauchte Arbeit wieder erzeugt, und es handelt sich nicht um Erzeugung von Arbeit aus einer anderen Naturkraft, sondern um Übertragung von Arbeit aus einer Zentrale nach Verbrauchsstellen hin, in denen die besondere Erzeugung von Arbeit nicht lohnt. Heute ist die Übertragung durch Druckluft allerdings vielfach durch die elektrische verdrängt, immerhin noch durchaus nicht veraltet in Fällen, in denen man eine hin und her gehende Bewegung gebraucht, die die elektrischen Maschinen nicht ohne weiteres ergeben, also bei Drucklufthämmern, für Stoßbohrmaschinen in Bergwerken und in manchen anderen Fällen. Zur Erzeugung umlaufender Bewegung dient die Druckluft heute noch in älteren Anlagen; so sind eine Reihe von Städten mit Druckluftzentralen ausgerüstet, die Druckluft für Kraftzwecke abgeben wie sonst Elektrizitätszentralen.

Wir können uns also eine Maschine, wie sie Abbildung 21 schematisch im Schnitt und Abbildung 31 im Bilde zeigt, mit Druckluft oder mit Dampf betrieben denken und erhalten dann die Diagramme, die dem allgemeinen Charakter nach in Abbildung 32 wiedergegeben sind.

Wir sehen in dieser Abbildung den Maschinenzylinder mit Kolben darin im Schnitt angedeutet und darüber und darunter das Diagramm je einer Zylinderseite abgebildet. Der Maschinenzylinder ist, im Gegensatz zu Abbildung 27, doppeltwirkend. Die (in Abbildung 32 fortgelassene) Steuerung verbindet abwechselnd die Deckelseite und die Stopfbüchsenseite mit dem Kessel und mit der Atmosphäre, abwechselnd spielen daher die beiden Kolbenseiten die Rolle des Zylinderinnern, in dem der Dampf arbeitet, und der Atmosphäre, die zurückgedrängt wird. Daher erhalten wir zwei Diagramme.

Die Diagramme kommen in der Weise zustande, daß wir zunächst bei geschlossenem Indikatorhahn den Stift einmal über das auf der Trommel aufgespannte Papier fahren lassen. Es wird eine wagerechte Gerade beschrieben, die dem Atmosphärendruck entspricht, weil nämlich bei geschlossenem Hahn das Indikatorinnere durch die kleine Bohrung, die man in Abbildung 29 auf der Vorderseite des Hahnes sieht, mit der Atmosphäre verbunden ist. Dann öffnet man den Hahn — die Maschine läuft dabei ruhig weiter — und legt den Schreibstift S wieder während mindestens eines vollen Umlaufs ans Papier.

Man möge nun im Auge behalten, daß im Diagramm wagerecht die Wege des Kolbens von einem Totpunkt zum anderen, senkrecht aber die vom Dampf auf den Kolben ausgeübten Drucke aufgetragen sind. Wenn wir bei der linken Endstellung des Kolbens, im Punkte A_1 des oberen Diagramms, beginnen, so strömt zunächst während eines Teils des Hubes Dampf (oder Luft) ein. Der Dampf hat dabei diejenige Spannung, die in dem Kessel herrscht, aus dem er kommt, vermindert nur um die meist nicht sehr erheblichen Druckverluste in der Rohrleitung. Die Einströmung findet statt, solange das Steuergetriebe der Maschine den Dampf zum Zylinder zutreten läßt. Nach einer gewissen Strecke, vielleicht bei einem Drittel des Hubes, wird im Punkte B_1 der Zylinder von der Leitung abgesperrt; nun wird der hochgespannte Dampf noch expandieren und dabei weitere Arbeit an den Kolben abgeben. Indem das abgeschlossene Dampfvolumen sich entsprechend der weiteren Vorwärtsbewegung des Kolbens ausdehnt, nimmt sein Druck ab nach der hyperbelähnlichen Kurve B_1C_1. Kurz vor

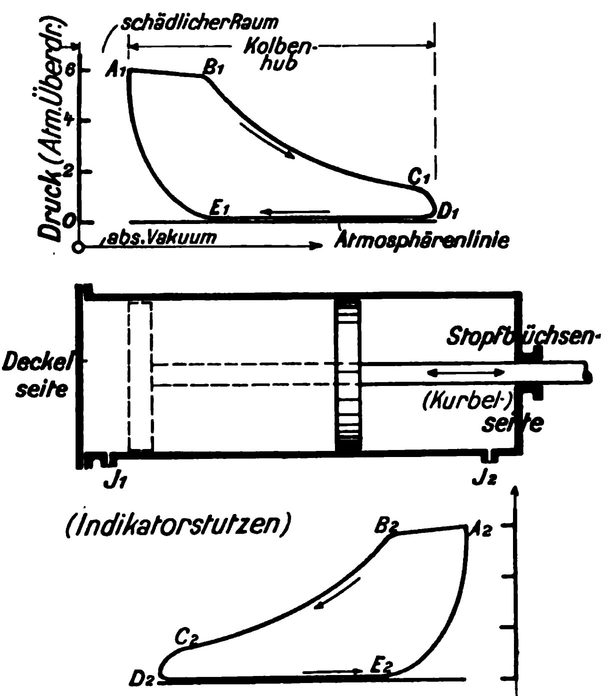
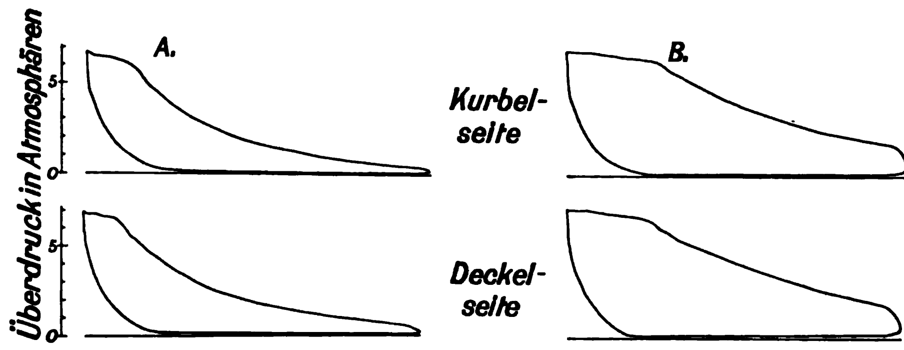


Abbildung 32. Doppeltwirkender Maschinenzylinder und zugehörige Indikatordiagramme der Deckelseite (oben) und der Stopfbüchsenseite (unten).

dem Ende des Kolbenhubes wird dann das Zylinderinnere mit der Atmosphäre in Verbindung gebracht, so daß der Dampf vom Punkte C_1 an zunächst so weit ausströ-



Abbild. 33. Zwei Diagrammpaare einer Dampfmaschine, mit dem Indikator aufgenommen bei kleinerer und bei größerer Leistung.

A. Bremsleistung 7,2 PS, indiz. Leistung 10,5 PS, 121 Umläufe in der Minute — B. Bremsleistung 15,8 PS, indiz. Leistung 19,3 PS, 120 Umläufe in der Minute.

men kann, daß auch im Zylinderinnern Atmosphärendruck entsteht, worauf weiterhin von D_1 an der Dampf von dem zurücklaufenden Kolben ins Freie verdrängt wird. Der Kolben aber läuft zurück, weil ihn das Schwungrad durchzieht, wohl auch deswegen, weil ja, während unsere Seite der Dampfmaschine den Dampf ausblasen läßt, auf der anderen gerade eine neue Dampfmenge arbeitet und daher den Kolben zurückschiebt, das Diagramm $A_2B_2C_2D_2E_2$ beschreibend. Man könnte nun das Ausblasen bis zum Totpunkt erfolgen lassen und dann neuen Dampf einströmen lassen. Dabei würde aber der Druck im Zylinder sehr plötzlich anwachsen, und solch plötzlicher Kraftwechsel pflegt, wo unvermeidlich etwas toter Gang im Getriebe ist, zu Stößen Anlaß zu geben, die die Maschine unnütz abnutzen und vor allem einen klappernden Gang verursachen. Deshalb sperrt man den Auspuff schon früher (im Punkte E_1) ab, so daß von hier an wieder eine bestimmte Dampfmenge im Zylinder eingeschlossen ist, die nun von dem unter dem Einflusse des Schwungrades nach links schreitenden Kolben komprimiert wird; ihr Volumen vermindert sich bis auf das des „schädlichen Raumes", den der Kolben an den Hubenden nicht durchmißt; dabei steigt ihr Druck, aber allmählich, nämlich wieder etwa nach einer Hyperbel, und so kommen wir zum Punkte A_1 zurück, in dem von neuem Dampf zugeführt wird, worauf das ganze Spiel wieder beginnt.

Bei diesem Spiel wird Arbeit vom Dampf an den Kolben abgegeben, weil beim Hingang der Druck des Dampfes durchschnittlich höher ist als beim Rückgang des Kolbens; der durchschnittliche Drucküberschuß ist für die bei einem Hub vom Dampf geleistete Arbeit maßgebend. Er muß vergrößert werden, d. h. also, der Flächeninhalt der entstehenden Figur muß sich vergrößern, wenn mehr Arbeit von der Maschine verlangt wird, wenn man sie z. B. mit einem Pronyschen Zaum belastet hat und dessen Backen schärfer anzieht, oder wenn man aus der Dynamomaschine, die von der Dampfmaschine angetrieben wird, mehr elektrischen Strom entnimmt. Wollte man den Zaum schärfer anspannen, ohne zugleich den indizierten Druck zu vergrößern, so würde der Dampf die Maschine nicht mehr in Bewegung halten können.

Die beiden Diagramme der Abbildung 33 zeigen, wie die Diagrammvergrößerung zustande kommt. Sie sind aufgenommen an der gleichen Maschine, die mit gleicher Umlaufzahl von etwa 120 in der Minute umlief, während mittels Bremszaumes Arbeit in verschiedenem Maße entnommen wurde, nämlich einmal 7,2 PS, das andere Mal

15,8 PS. Man sieht, wie eine Änderung der Diagrammform in dem Sinne vor sich geht, daß die Einströmung (Linie A_1B_1 Abbildung 32) über eine allmählich sich vergrößernde Strecke hin stattfindet, und daß dadurch einerseits der Dampf- (oder Luft-) Verbrauch steigt — wie ja mit steigender Arbeitsentnahme nur zu erwarten ist —, anderseits aber auch der Flächeninhalt der Diagrammfigur sich vergrößert, so daß also auch die indizierte Leistung wächst. Die Vergrößerung der Füllung bei wachsender Leistung macht der Maschinenregulator automatisch.

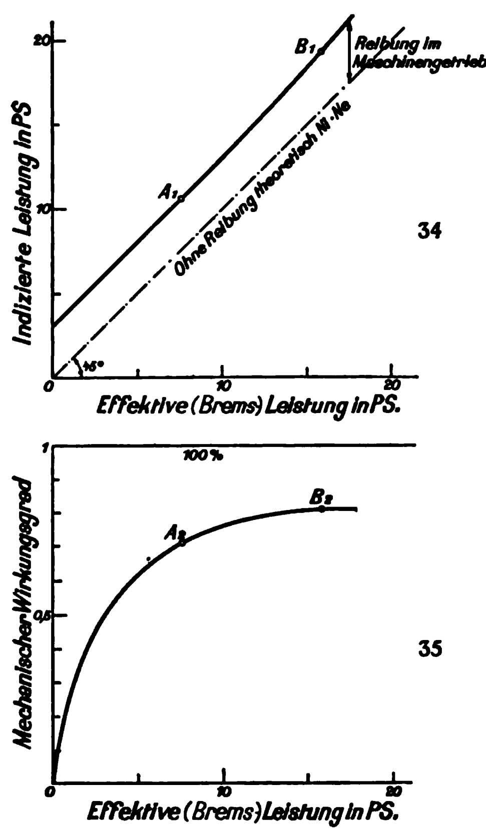


Abbildung 34 u. 35. Darstellung der Verluste im Maschinengetriebe nach den Diagrammen A und B der Abbildung 33.

Man bezeichnet die durch Bremsen festgestellte, an der Welle einer Kraftmaschine verfügbare Leistung als ihre effektive Leistung, auch wohl als Nutzleistung oder Bremsleistung. Im Gegensatz dazu bezeichnet man die mittels des Indikators gemessene, durch den Inhalt der Diagrammfläche gegebene als die indizierte Leistung der Kraftmaschine. Da im Getriebe der Maschine stets Arbeit durch Reibung in Stopfbüchsendichtungen, Wellenlagern, Geradführungen verbraucht wird, so muß die indizierte Leistung jederzeit größer sein als die Nutzleistung der Maschine, und zwar um den Betrag der durch Reibung verlorenen Leistung. So war beim Aufnehmen der Reihe, der die Diagramme Abbildung 32 angehören, die Bremsleistung der Reihe nach, durch Bedienen der Spannschrauben und unter Beobachten der Wage und der Umlaufzahl, zu 0, 7,2 und 15,8 PS festgestellt worden, während gleichzeitig die indizierte Leistung der Reihe nach zu 3; 10,5 und 19,3 PS ermittelt wurde. Trägt man diese Werte in ein Schaubild als abhängig voneinander ein, so erhält man Abbildung 34, die da zeigt, wie beide Leistungen miteinander steigen. Der Leistungsverlust durch Reibung ist annähernd, aber nicht genau konstant. Er ändert sich oft beträchtlich, weil bei Änderungen der Diagrammform die Kraftverhältnisse im Kurbeltrieb andere werden — je nach Umständen besser oder schlechter. — Außerdem kann man aus den Beobachtungsdaten noch den mechanischen Wirkungsgrad der Maschine berechnen, der immer der Quotient aus effektiver und indizierter Leistung ist und also angibt, ein wie großer Bruchteil der als indiziert dem Kolben mitgeteilten Leistung in Form von effektiver Leistung an der Welle verfügbar bleibt. Bei der größten Leistung wird der mechanische Wirkungsgrad $\eta_m = \frac{15,8}{19,3} = 0,82$ oder 82%; der Wert für die anderen Fälle und der Verlauf der Kurve ist aus Abbildung 35 zu entnehmen, deren Form charakteristisch für den Verlauf des mechanischen Wirkungsgrades ist: je größer die Leistung der Maschine, desto geringer ist prozentual der Verlust durch Reibung.

Die Berechnung der Bremsleistung geschieht, wie beim Peltonrad angegeben. Die Ermittelung der indizierten Leistung aus dem Diagramm sei am Beispiel der Abbildung 33B erläutert. Der Inhalt der Diagrammfläche wird zunächst ausgemessen, am einfachsten mit Hilfe des Planimeters (Abbildung 36). Er ergab sich für die Deckelseite zu 1830 qmm. Die ganze Länge des Diagramms war 93 mm (alles bei ursprünglicher Diagrammgröße). So ist die mittlere Höhe der umschriebenen Figur 1830 : 93 = 19,8 mm, und da eine Indikatorfeder verwendet war, für die 5 mm Hub des Schreibstiftes einer Druckzunahme von 1 Atm. entsprach, so war der im Mittel auf den Kolben wirkende Druck 19,8 : 5 = 3,96 Atm. Die technisch verwendete Atmosphäre entspricht nun, wie schon mehrfach erwähnt, einem Druck von 1 kg auf jedes Quadratzentimeter der Raumbegrenzung: 1 Atm. = 1 kg pro qcm. Der Maschinenzylinder hatte 200 mm lichten Durchmesser, also 314 qcm Querschnittsfläche, also erfährt der Kolben im Mittel eine nutzbare Kraft von $3{,}96 \frac{\text{kg}}{\text{qcm}} \times 314 \text{ qcm} = 1240 \text{ kg}$. Die Kraft also, die beim Hingang, beim Einströmen und Expandieren des Dampfes den Kolben vorwärtstrieb, war durchschnittlich um 1240 kg größer als diejenige Kraft, die der Kolbenbewegung widerstand, als der Kolben beim Auspuffen die Atmosphärenluft zurückdrängen und nachher den Dampf komprimieren mußte. Dieser Kraftüberschuß ist es, der Arbeit liefert, und zwar in folgendem Betrage: da die Maschine 150 mm Kurbelradius, also der Kolben 300 mm = 0,3 m Hub hatte, so wird bei einem Umlauf über 0,3 m Weg hin die Kraft von durchschnittlich 1240 kg wirksam sein; das entspricht 1240 × 0,3 = 372 m-kg indizierter Arbeit bei einem Umlauf der Maschine. Machte nun die Maschine minutlich 120 Umläufe, so leistete die Deckelseite jene indizierte Arbeit zweimal in jeder Sekunde: ihre Leistung war 372 × 2 = 744 m-kg in einer Sekunde oder auch 744 : 75 = 9,9 PS (75 m-kg sekundlich sind 1 PS!). — Zu dieser von einer Zylinderhälfte gelieferten Leistung ist die Leistung der anderen Hälfte, der Stopfbüchsenseite, einfach hinzuzuzählen; bei deren Berechnung wäre zu beachten, daß der Querschnitt der Kolbenstange, auf den ja der Druck nicht wirkt, vom Zylinderquerschnitt abzuziehen ist; auch wird das Diagramm nicht die gleiche Form und Größe haben — obwohl man gleiche Dampfverteilung beiderseits erstrebt und durch Aufnehmen von Diagrammen kontrolliert, sind doch Abweichungen unvermeidlich. So mögen sich auf der anderen Seite 9,4 PS Leistung ergeben haben, dann wäre die indizierte Leistung der Maschine 19,3 PS, wie angegeben.

Die Möglichkeit, die indizierte Leistung zu bestimmen, ist wertvoll, weil sich die Indizierung bei den größten Maschinen so bequem ausführen läßt wie bei kleineren. Die Bremsung mit dem Zaum aber beschränkt sich auf Maschinen mäßiger Größe, weil sonst die Bremsung nicht gefahrlos durchzuführen ist: ein zerreißendes Bremsband richtet schweres Unheil an, und die Erwärmung der gebremsten Scheibe durch die vernichtete Leistung wird gefährlich, weil im warmen Zustande die Materialien weniger widerstandsfähig werden, also die Scheibe unter der Einwirkung der Zentrifugalkraft explodieren kann. Eine dritte Art, die Leistung einer Kraftmaschine zu messen,

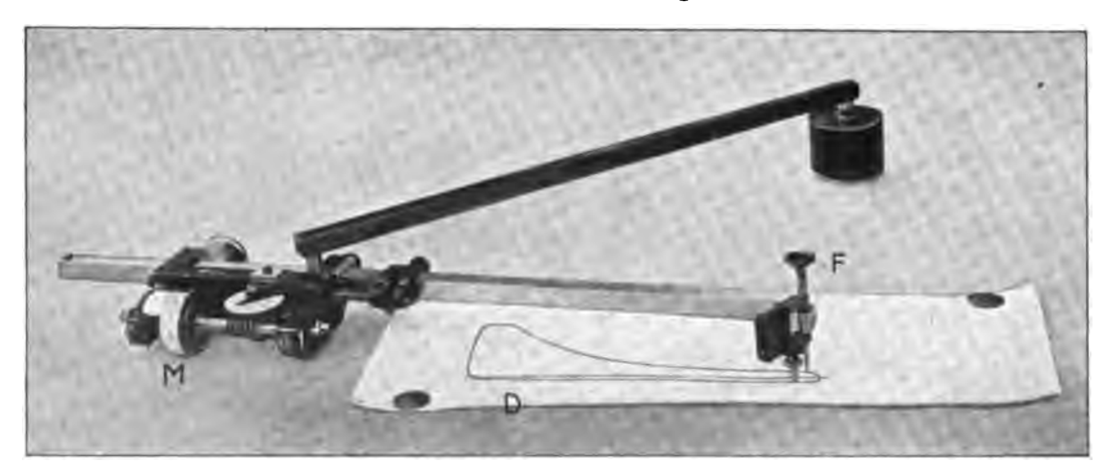


Abbildung 36. Polarplanimeter zum Ausmessen von Flächen. Umfährt man mit dem Fahrstift F das Diagramm D, so kann man am Meßrad M dessen Flächeninhalt ablesen. G. Coradi, Zürich.

besteht darin, daß man die von ihr in der angekuppelten Dynamomaschine erzeugte Energie mißt, also Spannung in Volt und Stromstärke in Ampère abliest, woraus die Leistung in Kilowatt folgt. Aber diese Meßweise beschränkt sich wieder auf die Kraftmaschinen, die der Erzeugung von Elektrizität dienen. Da man die rein umlaufenden (Kreiselrad-) Maschinen nicht indizieren kann, so ist es nicht bequem möglich, ihre Leistung festzustellen, wenn sie groß sind und nicht Elektrizität erzeugen.

4. UMSETZUNG VON WÄRME IN ARBEIT

Die Umsetzung von Arbeit in Wärme geht leicht vonstatten, wie man in der Natur jederzeit beobachten kann. Stecken wir ein Streichholz an, so geschieht das, indem wir durch Reiben des Zündkopfes auf der Zündfläche Wärme erzeugen, und die dadurch entstehende Temperaturerhöhung ist zum Entzünden des Zündkopfes ausreichend. Beobachten wir, daß an einem bremsenden Straßenbahnwagen Funken von der Bremse abstieben, so zeigt uns auch das — und wir können es auch beim Befühlen des Rades und der Bremsbacken nach dem Stillstande des Wagens konstatieren —, daß die dem fahrenden Wagen innewohnende kinetische Energie sich beim Bremsen durch den Widerstand der Reibung in Wärme verwandelt hat und die Eisenteile erwärmte. Auch Lager laufen warm infolge von Reibung, etwas warm schon im normalen Betriebe, gefahrdrohend aber, wenn durch Nachlässigkeit bei der Schmierung oder durch Hineinfallen eines Sandkörnchens die Reibung vergrößert ist.

Stellen wir in allen diesen Fällen sorgfältige Messungen an, so werden wir zu dem Ergebnis kommen, daß für je 427 m-kg verschwundener mechanischer Arbeit eine Kalorie entstanden ist, das mechanische Wärmeäquivalent oder, besser umgekehrt gesagt, das kalorische Arbeitsäquivalent.

Umgekehrt die Verwandlung von Wärme in Arbeit geht nicht so leicht vonstatten. Die komplizierte Bauart der Dampfmaschine und anderer Wärmekraftmaschinen lehrt uns, daß es großer Planmäßigkeit bedarf, um die Wärme zu veranlassen, sich in mechanische Arbeit zu verwandeln. Es bedarf sorgsamer Leitung des Arbeitsprozesses, insbesondere um befriedigende Mengen mechanischer Arbeit aus irgendeiner von der Natur uns zur Verfügung gestellten Wärmequelle zu ziehen. Ein sehr einfaches Mittel, Wärme in Elektrizität zu verwandeln, ist das Thermoelement; aber die umgesetzte Menge ist so klein, der Wirkungsgrad so schlecht, daß eine praktische Anwendung wirtschaftlich nicht in Frage kommt.

KREISPROZESSE MIT GASEN (Z. B. LUFT). Das wichtigste Mittel zu besserer Ausnutzung bietet uns das Verhalten der Gase und Dämpfe. Wir haben schon früher dargelegt, daß jedes Gas Arbeit hergibt, wenn es von einem höheren Druck bis auf Atmosphärendruck expandiert. Dabei waren allerdings nur beschränkte Arbeitsmengen erhältlich.

Um zu verstehen, in welcher Weise man das Verhalten zunächst der Gase zur dauernden Erzeugung mechanischer Arbeit aus der Wärme nutbar machen kann, bedienen wir uns des Druck-Volumen-Diagramms, das in Abbildung 37 dargestellt ist. Wir haben, wenn der Kolben in A′ steht, ein Kubikmeter Luft von Atmosphärenspannung und auch von atmosphärischer Temperatur abgesperrt. Ohne nun den Kolben zu bewegen, erwärmen wir die eingeschlossene Luft; sie wird eine Drucksteigerung erfahren, etwa bis zu dem durch die Strecke AC gegebenen Überdruck von 1 Atm., entsprechend einem gesamten (absoluten) Druck von 2 Atm. Wenn wir den gewünschten Druck erzielt haben, hören wir mit der Erwärmung auf und überlassen

den Kolben sich selbst. Da jetzt im Zylinder ein Druck von mehr als Atmosphärenspannung herrscht, so treibt der Druckübersdhuß über die Atmosphärenspannung hinaus den Kolben vorwärts, von C bis D, wobei der Druck sinkt. Wir können die Expansion der Luft so weit treiben, bis wir im Punkte D Atmosphärenspannung erlangt haben. Der Kolben hat sich dabei von A' nach D' bewegt. Würden wir ihn noch weiter bewegen, so würde Unterdruck im Zylinder entstehen und ein Arbeitsaufwand statt Arbeitsgewinn veranlaßt werden. Es bleibt uns also, wollen wir dauernd Arbeit erhalten und dadurch dauernd Wärme in Arbeit verwandeln, nichts weiter übrig, als nun die Luft abzukühlen, damit sich ihr Volumen von ED auf EA vermindert, wobei wir mit dem Kolben so nachfolgen, daß der Druck immer der gleiche bleibt. Im Punkte A angekommen, bleibt der Kolben stehen, weil wir hier ja, wie am Anfang des Ganzen, wieder auf Umgebungstemperatur angelangt sind, unter die wir nicht herunter können. Wir können nun wieder erwärmen, den Kolben wieder vorwärtsgehen lassen und so fort im unendlichen Spiel.

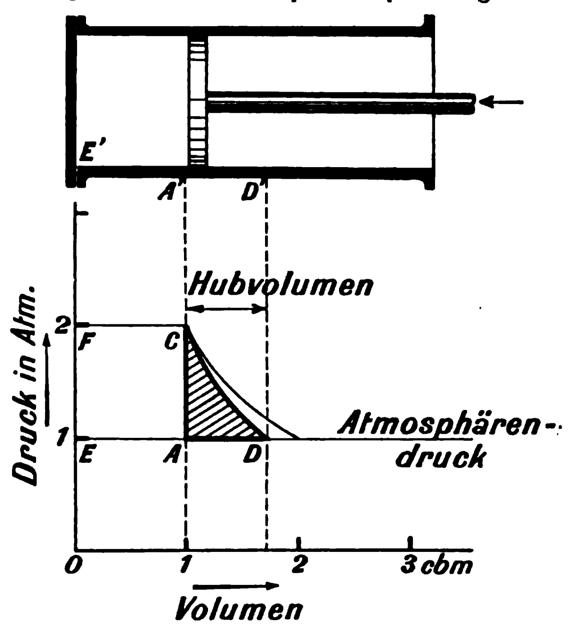


Abbildung 37. Diagramm eines einfachen geschlossenen Kreisprozesses. Die Expansionskurve CD verläuft etwas steiler als die zum Vergleich eingezeichnete gleichseitige Hyperbel.

Bei diesem Kreisprozeß, wie man solche mit der Luft, mit Gasen oder Dämpfen ausgeführten, periodisch sich wiederholenden Vorgänge nennt, würde man dauernd Arbeit gewinnen. Die Fläche ACD stellt die bei einem Spiel gewonnene Arbeitsmenge dar. Daß die Wärme die Quelle der Arbeit ist, folgt aus der Erfahrungstatsache, daß die unter Arbeitsleistung expandierende Luft sich abkühlt. Die Temperatur der Luft wird daher im Punkte D eine geringere sein als in C, immerhin noch höher als in A, da ja das Volumen noch größer ist, als es in A war. Wir bekommen aber auf dem Rückwege DA weniger Wärme wieder heraus, als wir bei der Drucksteigerung AC zugeführt hatten, und der Unterschied ist es, der sich in Arbeit verwandelt hat. Diese Darlegung ist richtig, aber nicht bündig, weil für die Wärmezuführung bei unverändertem Volumen einerseits, für die Wärmeabführung bei unverändert bleibendem Druck anderseits verschiedene spezifische Wärmen des Gases einzuführen wären. Das auszurechnen würde hier zu weit führen.

Solche Kreisprozesse, bei denen einem Gase immer abwechselnd Wärme zugeführt und wieder, jedoch in kleinerer Menge, entzogen wird, mit jedesmal zwischendurch eingeschobenen Bewegungen des Kolbens, auf den bei geschickt geleitetem Prozeß beim Hingang größere Kräfte wirken, als beim Rückgang ihm widerstehen — solche Kreisprozesse lassen sich in mannigfacher Art ausführen. An Abbildung 37 erläuterten wir einen geschlossenen Kreisprozeß: der ganze Zylinder war nämlich dauernd nach außen abgeschlossen, und immer die gleiche Luftmenge wurde erwärmt und abgekühlt. Man kommt auf dasselbe Ergebnis, wenn man den gleichen Kreisprozeß sich offen abspielen läßt, indem man in folgender Weise vorgeht: der Maschinenzylinder muß

diesmal mit Steuerorganen versehen sein, etwa einem Einlaßventil e und einem Auslaßventil a, die nach Bedarf geöffnet und geschlossen werden können. Der Kolben macht einen größeren Hub, nicht nur von A′ bis D′, sondern von E′ bis D′, und man läßt während dieser Bewegung folgende Vorgänge sich abspielen (Abbildung 38): von E_1 bis A öffnet man das am Zylinder befindliche Einlaßventil e, so daß kalte Luft aus der Atmosphäre angesaugt wird; bei A hält man den Kolben an und führt Wärme zu, nachdem man das Einlaßventil geschlossen hatte. Der Druck steigt bis C. Man läßt nun, indem der Kolben weitergeht, von C bis D die heiße Luft expandieren, bis atmosphärischer Druck erreicht ist, Punkt D, und müßte nun die Wärme abführen. Statt die Wärme abzuführen, öffnet man während des Rückganges des Kolbens von D′ nach E′ das Auslaßventil a, so daß die heiße Luft jetzt in die Atmosphäre tritt und sich mit der Außenluft mischt: es ist das die einfachste Art, in der man die Wärme abführen kann. Man kommt auf den Punkt E_2, der deshalb etwas höher liegt als E_1, weil Ein- und Auslaßventil Widerstände bieten. Beim nächsten Hingang des Kolbens saugt man von neuem kalte Luft an, wärmt sie in der Hubmitte, und so fort.

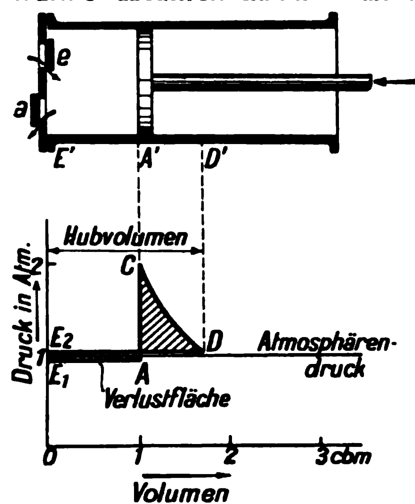


Abbildung 38. Diagramm des gleichen Kreisprozesses wie in Abbild. 37, aber offen ausgeführt: Prozeß der ältesten Gasmaschinen.

Der in Abbildung 38 dargestellte Kreisprozeß hat eine praktische Bedeutung gehabt. Nach ihm arbeitete die erste brauchbare Gasmaschine, die sogenannte atmosphärische Maschine von Nicolaus Otto, jenem genialen Konstrukteur, dem wir in erster Linie die Entwicklung der modernen Gasmaschine verdanken. Die Wärmezufuhr fand bei der Ottoschen Maschine dadurch statt, daß man nicht reine Luft, sondern ein Gemisch von Leuchtgas und Luft ansaugte und dieses bei einer bestimmten Kolbenstellung, dem Punkte A′ entsprechend, zum möglichst plötzlichen Verbrennen brachte, ohne übrigens dabei den Kolben anzuhalten, was ja praktischen Schwierigkeiten begegnet wäre.

Alle Gas- und überhaupt Verbrennungs-Kraftmaschinen sind wärmetechnisch dadurch gekennzeichnet, daß die Zuführung der Wärme nicht von außen her, sondern durch eine im Zylinder selbst stattfindende Verbrennung erfolgt. Wie das bei den neueren Gasmaschinen gemacht wird, werden wir später sehen. Daß statt mit Luft der Kreisprozeß mit einem anderen Stoff, nämlich einem Gemisch von Leuchtgas und Luft, mit einem anderen „Wärmeträger“ durchgeführt wird, ist wärmetechnisch unwesentlich. Man kann auch die Luft durch Wärmezufuhr von einer äußeren Wärmequelle aus erwärmen, und das geschieht in der Heißluftmaschine.

Obgleich es die Heißluftmaschine, auf die man eine Zeitlang große Hoffnungen setzte, zu größerer praktischer Bedeutung nicht gebracht hat, so möge doch ihre Wirkungsweise kurz beschrieben werden. Im allgemeinen führen die Heißluftmaschinen nicht den Kreisprozeß aus, der in Abbildung 38 dargestellt worden war, sondern sie arbeiten in der Weise, daß man den Druck nicht erst durch die Wärmezufuhr entstehen läßt. Die dadurch erzielbaren Drucksteigerungen sind nicht groß genug. Man arbeitet vielmehr in einer Weise, die durch Abbildung 39 dargestellt wird. Im Punkte A ist Atmosphärenspannung und gewöhnliche Temperatur im Zylinder vorhanden. Man

drückt den Kolben zunächst nach links, wodurch mit der Verkleinerung des Volumens der Druck des Gases nach der Kurve AB steigt. Nun führt man die Wärme zu, die wir früher auf der Strecke AC zugeführt hatten, und kommt dadurch, indem bei unverändertem Druck das Volumen zunimmt, auf den Punkt C, der übrigens diesmal nicht genau über A zu liegen braucht. Die Wärmezufuhr erfolgt, während der Kolben bereits nach außen geht. Wir brechen die Wärmezufuhr ab und lassen den Kolben weiter nach außen laufen, so daß die Expansionslinie CD entsteht. Nachdem wir bei D wieder auf Atmosphärenspannung heruntergekommen waren, kühlen wir die Luft ab und folgen mit dem Kolben nach, so daß bei unverändertem Druck die Linie DA beschrieben wird. Bei A müssen wir wieder die Ausgangstemperatur haben.

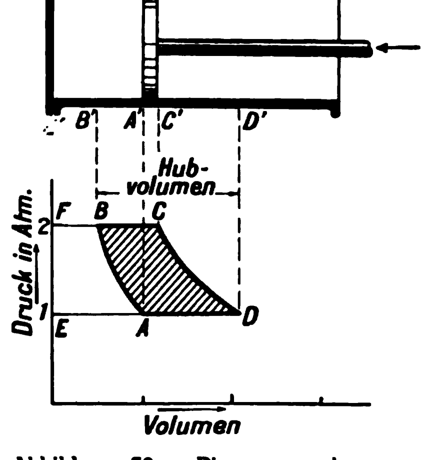


Abbildung 39. Diagramm eines geschlossenen, mit Luft auszuführenden Kreisprozesses.

Auch bei diesem Prozeß wird Arbeit gewonnen, und zwar im Betrage der schraffierten Fläche. Daß dabei Wärme verbraucht wird, folgt aus dem Energiesatz, läßt sich indessen ohne längere mathematische Entwicklungen nicht wohl nachweisen. Es kommt daher, daß bei der Erwärmung von B bis C ein größerer Temperaturunterschied durch Erwärmung zuzuführen ist, als von D bis A abzuführen ist.

Der in Abbildung 39 dargestellte Kreisprozeß ist es nun, der meist die Wirksamkeit der Heißluftmaschine veranlaßt. Man erkennt, daß abwechselnd Luft komprimiert werden und dann wieder expandieren muß, daß aber zwischen beide Vorgänge immer eine Wärmezufuhr und eine Wärmeabfuhr einzuschalten ist. Auch bei den Heißluftmaschinen ist aber vielfach die offene Anordnung bequemer als die geschlossene, und man kann den Kreisprozeß der Abbildung 39 leicht auch offen ausführen. Wenn nämlich in Abbildung 40 der Kolben zunächst von E_1 bis A kalte Luft ansaugt, sie bis B komprimiert, wenn dann die hochgespannte Luft von B bis C erwärmt wird und weiter die erwärmte Luft von C bis D expandiert, so kann man nun die immer noch warme Luft von D bis E_2 ins Freie entlassen und dafür neue, kalte Luft einnehmen. Das ist ein offener Kreisprozeß, der zur Arbeitsgewinnung in einer Heißluftmaschine führt. Natürlich müssen Steuerorgane e und a am Zylinder vorhanden sein und betätigt werden.

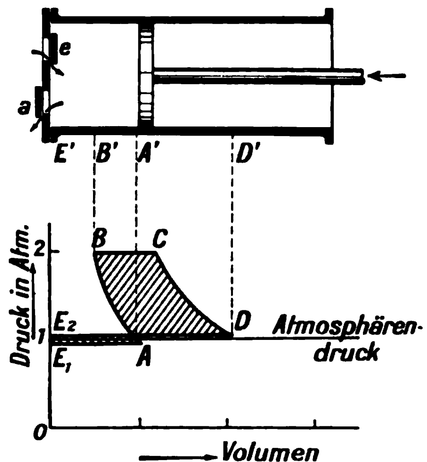


Abbildung 40. Diagramm des gleichen Kreisprozesses wie Abbildung 39, aber offen ausgeführt.

Heißluftmaschinen, die in dieser Art arbeiten, haben sich, wenn auch in mäßigem Umfange, doch immerhin betriebstechnisch bewährt, wenigstens zu einer Zeit, als man die Gasmaschine noch nicht kannte, die heute Gleiches sehr viel sicherer leistet. Bei der praktischen Ausführung des in Abbildung 40 dargestellten Kreisprozesses ist eines unbequem, nämlich daß bei Verwendung nur eines Zylinders, mit Ein- und Auslaßventil e und a, der Kolben

eine sonderbare Bewegung ausführen müßte, indem er zunächst von E′ nach A′ vorwärts-, dann nach B′ zurück-, nach D′ vorwärts-, und dann wieder nach E′ zurückgehen müßte. Diese mechanisch schwer zu erzielende Kolbenbewegung kann umgangen werden, indem man den ganzen Prozeß nicht in einem, sondern in zwei Zylindern verschiedenen Volumens sich abspielen läßt; der eine Kolben läuft gewissermaßen von E′ nach A′ und komprimiert die Luft, während der andere das Volumen E′D′ bestreicht und die Luft expandieren läßt. Zwischen beiden Zylindern muß die hochgespannte Luft erwärmt werden, was dadurch möglich ist, daß man zwischen beide Zylinder irgendeine Anwärmeinrichtung einschaltet: am einfachsten läßt man die Luft selbst durch ein Koksfeuer hindurchgehen, dessen Verbrennung sie, sich selbst dabei erhitzend, unterhält.

In dieser Weise arbeitet die **Brownsche Heißluftmaschine**, deren Aufbau schematisch durch Abbildung 41 erläutert wird und deren Bild unsere Abbildung 42 zeigt. Wir haben in Abbildung 41 zwei Zylinder; im ersten wird die Luft komprimiert, während sie im anderen expandiert und dadurch Arbeit leistet. Die beiden Kolben sind durch den in der Mitte gelagerten Balancier so miteinander verbunden, daß sie sich immer zugleich bewegen und etwa gleiche Hübe haben. Aber die Zylinderdurchmesser sind verschieden, und daher sind die Volumina verschieden, die von den beiden Kol-

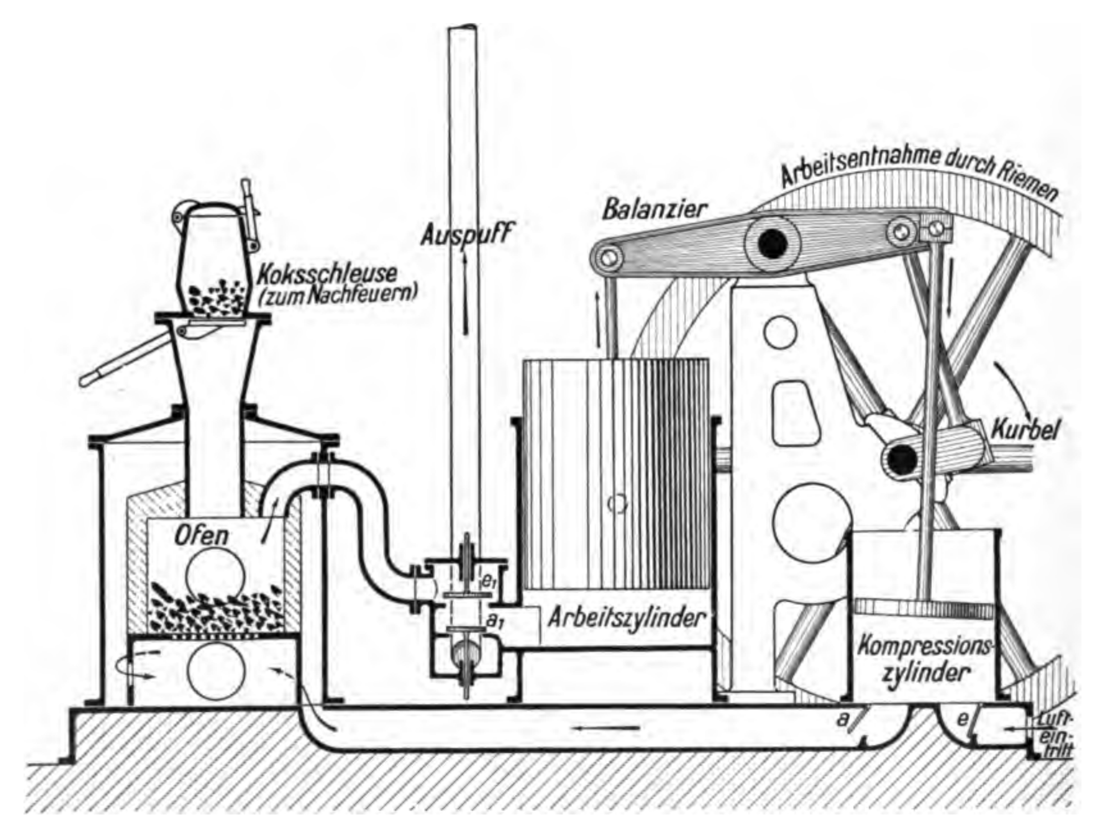


Abbildung 41. Schema einer Brownschen Feuerluftmaschine. Der Kolben des Kompressionszylinders ist mit schmaler Lederdichtung ausgeführt und taumelt so, wie die Figur es erkennen läßt. Die Steuerung des Arbeitszylinders (Ventile e_1 und a_1) ist zwischen Ofen und Arbeitszylinder gezeichnet, während sie in Wirklichkeit vor dem Zylinder liegt (Abbildung 42).

ben freigelegt werden — der Kompressionszylinder muß ja das Volumen E'A', Abbildung 39, der Expansionszylinder aber E' D' haben. Beide Zylinder sind mit Ein-



Auspuff. Steuerung.

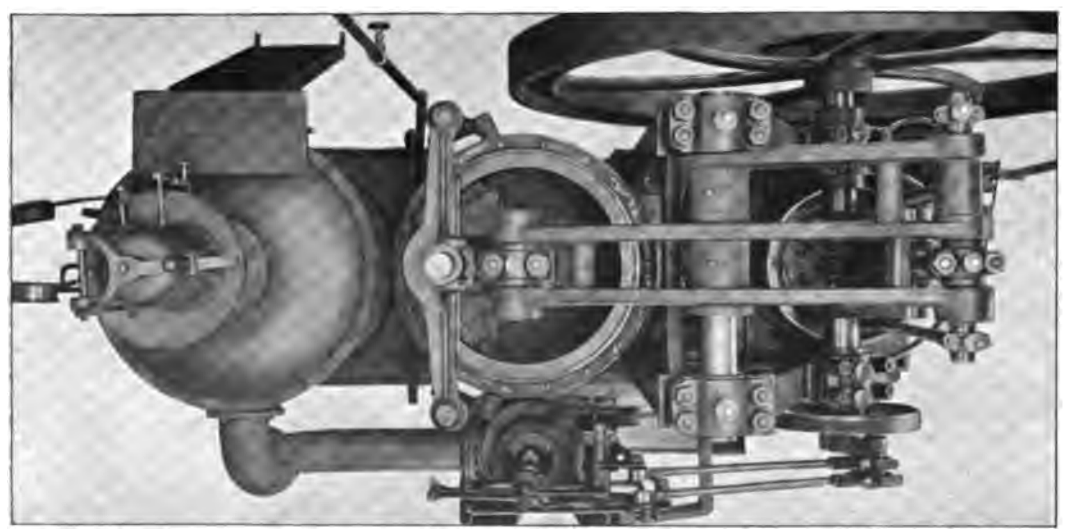


Abbildung 42. Feuerluftmaschine von A. & F. Brown, New York. Erbaut im Jahre 1878, im Dienst bis 1911 in Rixhöft (Westpreußen) zum Betrieb der Nebelsirenen. Nutzleistung 10 PS. Zum Vergleich links unten ein Meterstock.

und Auslaßventilen versehen. Der Kompressionszylinder saugt durch das Einlaßventil e — eine Lederklappe — Luft von Atmosphärenspannung ein, komprimiert sie und entläßt sie durch das Auslaßventil in einen Kanal, der unter der Maschine hinlaufend in der Grundplatte ausgespart ist. Die auf etwa 2 Atm. Überdruck komprimierte Luft tritt unter den Rost der Feuerung, und zwar ist die Anordnung so getroffen, daß sie zunächst den eigentlichen Ofen umspült, damit möglichst wenig Wärme nach außen hin verloren geht, und dann erst unter den Rost tritt und im Innern des Ofens völlig erwärmt wird. Es sei hier bemerkt, daß mit der Verbrennung an sich eine Veränderung des Luftvolumens nicht eintritt, es entstehen dem Volumen nach ebensoviel Verbrennungsgase, wie Luft zur Verbrennung verbraucht wird. Aber wenn sich die Luft auf die Feuertemperatur erhitzt, nimmt ihr Volumen durch die Erwärmung zu. Die erhitzten Gase treten nun durch ein Einlaßventil e_1 in den Arbeitszylinder und expandieren hier, nachdem der Einlaß abgeschlossen ist, auf etwa atmosphärischen Druck, worauf sich das Auslaßventil a_1 öffnet und die kaum noch gespannten Verbrennungsgase durch ein Auspuffrohr in die Atmosphäre entweichen. Man bezeichnet wohl die Maschinen, bei denen die arbeitende Luft selbst durchs Feuer geht und also die Feuergase selbst expandieren, als Feuerluftmaschinen. Bei den Heißluftmaschinen im engeren Sinne würde die Erwärmung der Luft durch von außen beheizte Heizflächen hindurch vonstatten gehen — was im Grunde ganz auf dasselbe hinauskommt.

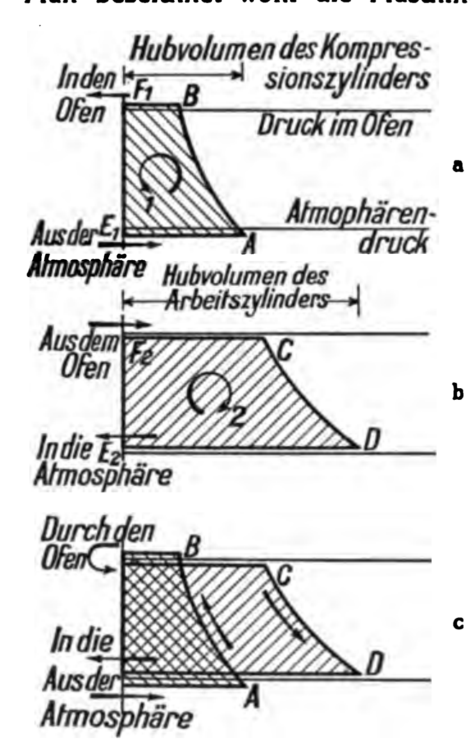


Abbildung 43. Zusammensetzung des Diagramms c, entsprechend Abbild. 40, aus den Diagrammen a und b der beiden Zylinder der Feuerluftmaschine.

Man wird an der schematischen Abbildung 41 gut erkennen, in welcher Weise mechanisch die Arbeitslieferung der Maschine zustande kommt. Bei dem Übergang vom Kompressions- in den Arbeitszylinder findet eine Druckänderung nicht statt, und der Arbeitskolben erfährt, auf das Quadratzentimeter bezogen, den gleichen treibenden Druck, der auch dem Kompressorkolben widersteht. Aber trotzdem wird die auf den Arbeitskolben wirkende Kraft größer sein, in dem Maße, wie der Arbeitskolben, dem größeren Querschnitt des Zylinders entsprechend, größer ist als der Kompressionskolben. Erst die Zuführung der Wärme in der Feuerung aber ist es, die die Luft befähigt, den größeren Raum des Arbeitszylinders auch auszufüllen, nachdem doch der Kompressionszylinder nur das kleinere Volumen verarbeitet hat.

Daß bei dieser Anordnung der Brownschen Heißluftmaschine wirklich der in Abbildung 40 dargestellte Kreisprozeß ausgeführt wird, geht aus Abbildung 43 hervor. Der Kompressionszylinder führt einen Prozeß aus, der durch Abbildung 43a dargestellt ist: von E_1 bis A wird Luft angesaugt; beim Rückgang des Kolbens wird zunächst die angesaugte Luft komprimiert nach der Kurve AB; wenn in B der im Ofen herrschende Druck erreicht oder vielmehr etwas überschritten ist, öffnet er die Auslaßklappe, und die Luft wird in den Ofen gedrückt, dessen Raum so groß ist, daß der

Druck nicht wesentlich steigt (Linie BF_1). Im Ofen wird die Luft erwärmt, beim Öffnen des Einlaßorgans des Arbeitszylinders kann daher das Volumen F_2C (Abbildung 43b), entnommen werden, ohne doch dem Gewicht nach bei einem Hub mehr aus dem Ofen zu nehmen, als bei einem Hub hineingetan wird. Der Arbeitszylinder, dessen Diagramm Abbildung 43b darstellt, wird also zunächst mit Druckluft gefüllt (Linie F_2C), bei C wird der Luftzutritt abgesperrt und die Expansion nach der Kurve CD eingeleitet. Wenn dann der Arbeitskolben umkehrt, wird zugleich der Auslaß geöffnet und die verbrauchte Luft ausgeschoben (Linie DE_2). Die Maschine liefert also zwei Indikatordiagramme, eins an jedem Zylinder. Das am Kompressionszylinder aufgenommene bedeutet verbrauchte, das am Arbeitszylinder aufgenommene bedeutet erzeugte Arbeit. Dieser Unterschied macht sich äußerlich dadurch kenntlich, daß die beiden Diagramme in verschiedenem Drehsinn gezeichnet werden, vergleiche Pfeil 1 und Pfeil 2. — Legt man beide Diagramme Abbildung 43a und 43b übereinander, so entsteht Abbildung 43c: die kreuzschraffierte Fläche hebt sich als einmal geleistet, einmal verbraucht fort, und die übrigbleibende Fläche ist die Fläche ABCD der Abbildung 39 oder 40. Die schmalen Streifenflächen links von den Buchstaben A und B, Abbildung 43c, bedeuten einen Arbeitsaufwand, der zum Bewegen der Luft durch die Ventile, Rohre und durch die Feuerung nötig ist, der an sich mit der Wirkung der Maschine nichts zu tun hat; dieser Arbeitsverlust allerdings ist der Verteilung des Vorganges auf zwei Zylinder zuzuschreiben. — Abbildung 44 zeigt die an der Heißluftmaschine mit dem Indikator aufgenommenen Diagramme.

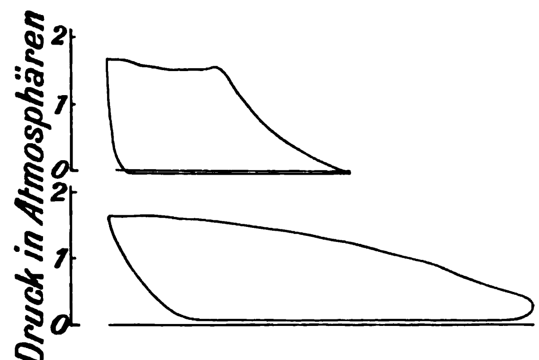


Abb. 44. Indikatordiagramme der Feuerluftmaschine.
Kompressionszylinder verbraucht 22,3 PS
Arbeitszylinder erzeugt 36,7 PS
Nutzleistung etwa 10 PS
} bei 60 Uml/Min.

An mechanischen Einzelheiten wäre noch zu erwähnen, daß natürlich die Bewegung der Ein- und Auslaßventile eine solche sein muß, daß sie sich während derjenigen Teile des Kolbenhubes öffnen und schließen, wo dies gerade nötig ist. Dazu müssen die Ventile des Arbeitszylinders von außen her gesteuert werden, d. h. es muß durch die Bewegung der Maschinenwelle oder des Balanciers die Bewegung der Ventile künstlich eingeleitet werden; in der Tat erkennen wir in Abbildung 42 außer den in der schematischen Abbildung wiedergegebenen Teilen noch ein ziemlich umständliches Steuergetriebe, das die Bewegung richtig bewirken soll. Der Kompressionszylinder kann mit selbsttätigen Ventilen ausgerüstet sein; er ist mit Lederklappen versehen, die sich in der einen Richtung von selbst öffnen, die sich aber von selbst schließen, wenn die Luftbewegung in der falschen Richtung erfolgen will. Außerdem kann man die Feuerung nicht ohne weiteres mit Koks beschicken, wenn in der Feuerung ein Überdruck von 2 Atm. herrscht; beim Öffnen der Feuertür würde der Druck der heißen Gase dem Bedienenden entgegenschlagen. Es muß also eine Koksschleuse geschaffen werden, die ähnlich wirkt, wie eine Schiffsschleuse das Schiff durchläßt, trotz des Höhenunterschiedes des Wassers auf beiden Seiten; so wird auch hier zunächst durch Öffnen der einen Tür das Einfüllen des Brennstoffes in die Schleuse gestattet, darauf wird die obere Klappe geschlossen, und wenn man nun die untere öffnet, fällt der Koks herab, ohne daß das Feuer herausschlagen kann.

Mit Hilfe solcher Kreisprozesse ist es also möglich, unter Verwendung von Luft und teilweise auch von Verbrennungsgasen, jedenfalls aber von gasförmigen Körpern als Wärmeträgern, Wärme in Arbeit umzuwandeln. Warum haben sich aber die so einfach scheinenden Heißluftmaschinen nicht eingebürgert, die gegenüber der Dampfmaschine den Vorteil hätten, daß man von der Verwendung eines Kessels unabhängig ist? Ein wesentlicher Grund dafür ist, daß Heißluftmaschinen im Aufbau unbequem groß werden. Abbildung 45 läßt das erkennen, da diese Maschine trotz ihrer Größe — ein Meterstab liegt links unten an der Maschine — doch nur eine Leistung von 10 PS zu liefern vermag. Ungünstig ist die Verwendung von zwei Zylindern, von denen der eine Arbeit verbraucht und der andere eine allerdings größere Arbeitsmenge liefert. Nach außen hin verfügbar ist also nur der Unterschied von dem, was der eine liefert, und von dem, was der andere verbraucht. Die Maschine bedarf daher größerer Zylinderabmessungen, als wenn ein einzelner Zylinder unmittelbar die erforderliche Arbeit lieferte. Und nicht nur die Größe der Zylinder wird unbequem, sondern zugleich mit der Zylindergröße wachsen die Kräfte, die zwischen den beiden Zylindern beim Auf- und Niedergang hin und her geworfen werden, deren Differenz aber immer nur nutzbar wird, und das ganze Getriebe der Maschine muß entsprechend stärker gehalten werden. Mit der Vergrößerung aller Teile ist nicht nur eine Erhöhung der Beschaffungskosten und eine größere Rauminanspruchnahme verbunden, sondern es verschlechtert sich zugleich der Wirkungsgrad der Maschine im Betriebe. Das kräftige Gestänge erfordert große Lager, diese sind mit großen Kräften belastet, es ergeben sich entsprechend große Reibungskräfte, die überdies bei den größeren Maschinenabmessungen auch größere Reibungswege zu überwinden haben, und so werden die mechanischen Verluste in der Maschine übermäßig große Werte erlangen. Ist nun auch die Wärmeausnutzung in der Heißluftmaschine an sich günstig genug, um bei voller Belastung leidliche Wirkungsgrade, trotz der mechanischen Verluste, zu erzielen, so bleibt noch zu bedenken, daß die mechanischen Verluste im wesentlichen unverändert bleiben, auch wenn die Maschine kleinere Leistungen abgibt, wenn sie mit der Hälfte oder mit einem Viertel der vollen Kraft Arbeit leistet.

KREISPROZESSE MIT DÄMPFEN. Hier können wir nun die Gründe erkennen, warum die Dämpfe eine so hervorragende Rolle für die Arbeitserzeugung spielen. Es läßt sich theoretisch nachweisen, daß an sich keine größere Arbeitsausbeute erzielt werden sollte, wenn man Dampf als Wärmeträger verwendet, als wenn man Gase dazu verwendet. Praktisch aber haben die Dämpfe den großen Vorzug, auf kleinere Zylindervolumina zu führen. Bei ihrer Verwendung nämlich kann man den Vorteil wahrnehmen, daß der Dampf sich aus Flüssigkeit durch Zuführung von Wärme entwickeln läßt, daß aber das Volumen der Flüssigkeit verschwindend klein ist gegenüber dem des Dampfes.

Ein Kreisprozeß unter Verwendung von Dampf werde an Abbildung 45 erläutert. Wir haben in A das recht kleine Flüssigkeitsvolumen EA bei Atmosphärenspannung im Zylinder. Um es unter Druck zu setzen, ist eine nennenswerte Arbeit nicht aufzuwenden; denn Flüssigkeiten sind fast inkompressibel, sie ändern ihr Volumen kaum mit steigendem Druck, und so legt der Kolben kaum einen Weg zurück; die Kompressionslinie AB ist daher von einer Senkrechten nicht zu unterscheiden. Wenn wir nun durch Wärmezuführung die Flüssigkeit — Wasser, wollen wir kurz sagen, obgleich auch andere Flüssigkeiten verwendbar sind — verdampfen, so vergrößert sich das Volumen von B bis C. Nun lassen wir, nach Abstellen der Wärmezufuhr, den Dampf sich ausdehnen, bis er bei D Atmosphärenspannung erlangt hat, und können

ihn dann entweder in die Atmosphäre ausblasen lassen, was ja immer die einfachste Art ist, die Wärme wieder abzuführen, nur müssen wir dann frisches Wasser verwenden und haben einen offenen Kreisprozeß. Wir können aber auch bei D eine Wärmeentziehung durch Kühlwasser einsetzen lassen, dann würde sich der Dampf wieder in Flüssigkeit verwandeln, das Volumen würde wieder auf EA zusammenschrumpfen, wir lassen den Kolben nachfolgen und können den Kreisprozeß von neuem beginnen.

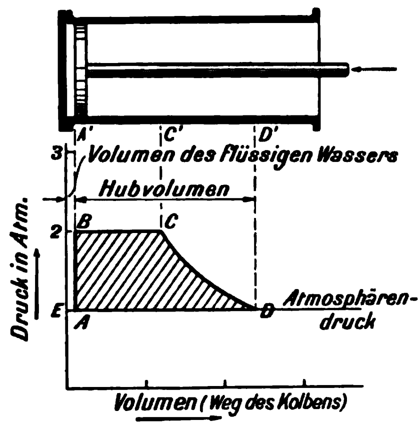


Abbildung 45. Diagramm eines geschlossenen, mit Wasser und Dampf auszuführenden Kreisprozesses.

Wir sehen, daß im Grunde genommen der Kreisprozeß, mit Dampf ausgeführt, ganz derselbe ist, wie wir ihn auch in der Heißluftmaschine verwenden. Ja, der Vergleich geht noch weiter. Auch bei der Dampfmaschine verlegen wir gern die Wärmezufuhr und die Volumvergrößerung nicht in den Zylinder selbst, sondern in einen besonderen Behälter, den Dampfkessel. Und auch bei der Dampfmaschine verwenden wir nicht nur einen, sondern zwei Zylinder, von denen der eine das Arbeitsmittel unter Druck setzt, während es im anderen expandiert. Das Wasser wird von der Kesselspeisepumpe unter Druck gesetzt, dann wird ihm im Kessel Wärme zum Verdampfen zugeführt, im Dampfzylinder expandiert der Dampf unter Arbeitsabgabe, und dann bläst er in die Atmosphäre aus. Die Kesselspeisepumpe entspricht also dem Kompressionszylinder der Heißluftmaschine, und auch bei der Dampfmaschine ist nach außen nur der Unterschied in der Arbeitsleistung zweier Zylinder verfügbar; wenn man die Speisepumpe von der Dampfmaschine mit antreiben läßt, so erkennt man das ohne weiteres.

In Abbildung 46 ist schematisch eine Dampfkraftanlage mit einer altmodischen Balanciermaschine so gezeichnet, daß der Vergleich mit der Heißluftmaschine in die Augen springt. Die einzelnen Teile sind ebenso angeordnet wie die innerlich entsprechenden Teile der früheren Abbildung 41. Der in dem Dampfkessel entstehende Dampf wird dem Dampfzylinder zugeführt und treibt durch einen Balancier auf die Kurbel und das Schwungrad. Vom Balancier aus (häufig auch in anderer Weise, etwa von der Kurbelwelle aus) wird eine Speisepumpe betrieben, die bei jedem Hube so viel Wasser in den Kessel drückt, wie bei einem Hube als Dampf in den Zylinder geht.

Verfolgen wir den Lauf des Wassers und seines Dampfes im Vergleich zu dem Wege der Luft in der Heißluftmaschine. Zunächst wird das Wasser von der Speisepumpe aus einem Behälter angesaugt und unter Druck gesetzt — unter den Kesseldruck nämlich. Die Speisepumpe entspricht also dem Kompressorzylinder der Luftmaschine. Im Kessel wird durch Wärmezufuhr ohne Veränderung des Druckes nur das Volumen vergrößert, durch Verdampfung, weil nämlich Wasserdampf ein viel größeres Volumen hat als das gleiche Gewicht flüssigen Wassers. Der Kessel entspricht also dem Ofen der Heißluftmaschine. Daß diesmal die Wärmezufuhr durch die Wandungen des Kessels hindurch erfolgt, während bei der Heißluftmaschine die Luft durchs Feuer selbst hindurchging, ist ein äußerlicher Unterschied: man hätte auch bei der Heißluftmaschine die Erwärmung der Luft vornehmen können, indem man sie durch ein von außen mit Feuer beheiztes Rohrsystem schickte. Der auf

größeres Volumen gebrachte Wärmeträger geht in den Dampfzylinder, Arbeit leistend, indem er durch irgendeine Steuerung eingesteuert wird. Die Steuerung könnte durch Ventile erfolgen, gezeichnet ist als Steuerorgan der uns schon bekannte Wattsche Flachschieber; dessen Antrieb von der Kurbelwelle aus ist der Übersichtlichkeit wegen fortgelassen. Der Dampfzylinder entspricht dem Arbeitszylinder der Luftmaschine. Von ihm aus pufft der Dampf in die Atmosphäre, weil das die einfachste Art der Wärmeabfuhr ist. Immerhin wird man ihn nicht stets auspuffen lassen, denn Wasser steht nicht so allgemein zur Verfügung wie Luft. Es könnte also auch wohl in Frage kommen, den Dampf durch Wärmeentziehung wieder zu verflüssigen und das Kondenswasser in den Kessel zurückzuspeisen, was auch häufig geschieht. Eine solche Rückführung, die Anwendung eines geschlossenen Kreisprozesses, ist also bei der Dampfmaschine so gut möglich wie bei der Heißluftmaschine.

Abbildung 47 gibt das Diagramm für das Zusammenwirken von Speisepumpe und Arbeitszylinder, und man sieht auch hier sachlich die Übereinstimmung mit Abbildung 43c; nur die Größenverhältnisse sind andere.

Die Analogie ist eine vollkommene. Insbesondere hat man, was bei anderer Darstellung nicht immer so in die Augen springt, auch in der Dampfkraftanlage zwei Zylinder, von denen einer Arbeit leistet, einer solche verbraucht, und nur der Unterschied der beiden Leistungen wird nach außen hin frei. Aber man erkennt schon an den Größenabmessungen der beiden Zylinder im Verhältnis zueinander, die in beiden Abbildungen maßstäblich gehalten sind, wieviel günstiger die Verhältnisse für die Dampfmaschine liegen. Die Speisepumpe ist klein und verbraucht wenig Arbeit, daher werden nicht so große Arbeitsmengen zwischen beiden Zylindern hin und her geworfen; der Balancier wird leichter, so wie die Zylinder selbst kleiner werden. Überdies kann man den Zylinder der Dampfmaschine doppeltwirkend ausführen, den Dampf also sowohl im Aufwärts- wie auch im Abwärtsgang des Kolbens treiben lassen, eine Wirkung, die der Flachschieber ohne weiteres einleitet. Bei der Heißluftmaschine trifft solche doppelte Wirkung auf Schwierigkeiten, weil die Temperaturen der Feuergase höher sind und der Kolben nicht wohl von beiden Seiten ihnen ausgesetzt werden kann. Auch bei der Gasmaschine hat sich die einfache Wirksamkeit lange gehalten, weil es erst in neueren Jahren gelang, die beiderseits von Feuergasen bestrichenen Kolben so zu kühlen, daß sie die Temperatur aushielten. Durch die doppelte Wirkung wird der Zylinder noch weiter verkleinert gegenüber dem Volumen, das beim Arbeitszylinder der Heißluftmaschine nötig ist.

Die doppelte Wirksamkeit führt allerdings gegenüber der Konstruktion der Heißluftmaschine mit ihrem langen „Tauchkolben“ (Plunger) auf die Notwendigkeit, eine Stopfbüchse anzuordnen, durch die hindurch die Kolbenstange dampfdicht ins Freie geht. Zur Dichtung diente früher Hanf, heute meist Asbest oder Metall. Mit der Anwendung der Stopfbüchse ergibt sich die Notwendigkeit, das obere Stangenende geradezuführen, es kann nicht mehr unmittelbar am Balancier angreifen und eine Kreisbewegung machen. Als Geradführung ist das Wattsche Paralellogramm gezeichnet, das mit Hilfe eines Gegenlenkers eine fast genaue Geradführung des oberen Endes der Kolbenstange ergibt.

Heute werden Balanciermaschinen kaum noch verwendet. Liegende oder stehende Maschinen führt man so aus, daß die Kolbenstange durch einen Kreuzkopf und eine Pleuelstange hindurch direkt auf die Kurbel treibt, wie wir das aus Abbildung 21 und 31 kennen. Die Geradführung des freien Endes der Kolbenstange geschieht durch die Kreuzkopfführung, entweder nur unten (Abbildung 21) oder unten und oben in

einem sogenannten Bajonettrahmen (Abbildung 31). Es ist wohl kein Zufall, daß man diese scheinbar einfachste Bauart nicht sogleich verwendete. Die Kreuzkopf-

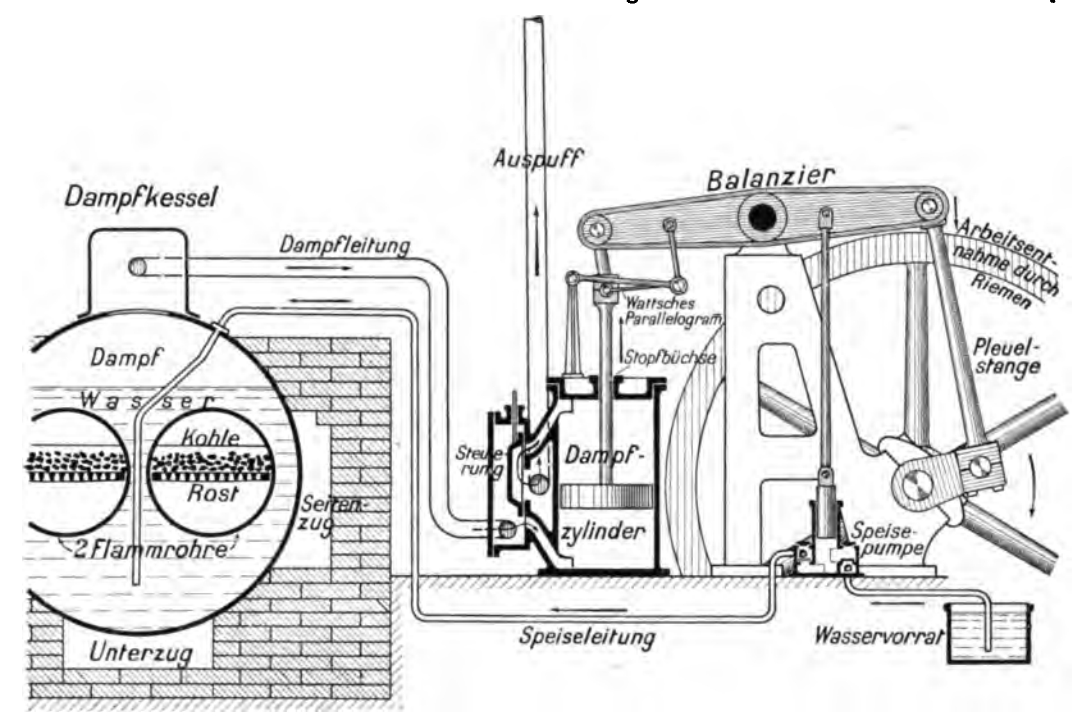


Abbildung 46. Schema einer Dampfkraftanlage, bestehend aus Flammrohrkessel und Balanciermaschine alter Bauart. Anordnung der Teile wie die der entsprechenden Teile in Abbildung 41. Antrieb der Steuerung fortgelassen.

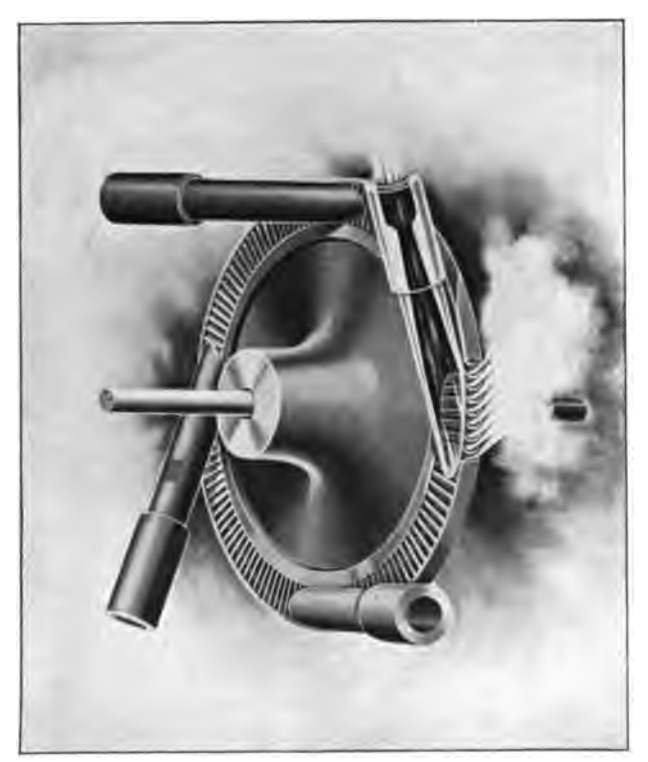
geradführung ist nicht leicht herzustellen, die Führungsfläche muß sauber in die Zylinderverlängerung fallen, und eine so genaue Bearbeitung dieser großen Flächen stieß früher werkstattechnisch auf Schwierigkeiten, während es leicht möglich war, die Stangen des Wattschen Parallelogramms befriedigend zu bearbeiten. Diese Bemerkung mag darauf hinweisen, wie der Fortschritt des Maschinenbaues immer eng an die Möglichkeiten werkstattmäßiger Bearbeitung entsprechend großer oder kleiner Stücke gebunden ist. Auch der Dampfturbinenbau und fast mehr noch der Automobilbau konnten sich erst entwickeln, als einerseits für diese schnellaufenden Maschinen die Baustoffe von genügender Widerstandsfähigkeit sowie anderseits Bearbeitungsverfahren für diese widerstandsfähigen Materialien gefunden waren. —

Hubvolumen der Speisepumpe
B
Kesseldruck
C
Durch den Kessel
In die
Aus der
Atmosphäre
A
D
Atmosphärendruck
Hubvolumen des Dampfzylinders

Abbild. 47. Zusammensetzung des Diagramms der Abbild. 45 aus den Diagrammen der Speisepumpe und des Dampfzylinders. Man vergleiche Abbild. 43c.

DIE PRAKTISCHE DURCHFÜHRUNG DES KREISPROZESSES kann in verschiedenster Weise vorgenommen werden, insbesondere ergeben sich zwei voneinander grundverschiedene Maschinengattungen: die Kolbenmaschine einerseits, die rein umlaufende Kreiselradmaschine anderseits. Während bei den Kolbenmaschinen der Druck als solcher wirksam ist, den Kolben vorwärtstreibend, ist bei den Kreiselradmaschinen die Arbeitsweise des

Wasserdampfes so, wie wir sie für Wasser am Segnerrad und am Peltonrad kennen gelernt haben. Dem Peltonrad entsprechen in ihrer Wirksamkeit genau die Freistrahl-Dampfturbinen; deren Wirkungsweise wird durch Abbild. 48 veranschaulicht, die eine Laval-Dampfturbine darstellt, freilich unter Fortlassen des Gehäuses. Der Dampfstrahl wird in einer Düse gebildet, die aus hier nicht zu erörternden Gründen in der Strahlrichtung konisch erweitert sein muß; die Erkenntnis, daß dies nötig ist, war seinerzeit das Hauptverdienst des Schweden de Laval, wodurch er einer der Haupterfinder dieser Maschinengattung geworden ist. In der Düse setzt sich der Druck vollständig in Geschwindigkeit um; der mit hoher Geschwindigkeit aus der Düse tretende Strahl wird infolge der Schaufelgestalt abgelenkt und gibt je nach der Geschwindigkeit des Rades mehr oder weniger seiner kinetischen Energie an das Schaufelrad ab. Wieviel er abgibt, hängt ebenso wie beim Peltonrad von der Geschwindigkeit des Radkranzes ab, die etwa die Hälfte der Dampfgeschwindigkeit sein muß. Da man nun aber beim Dampf wegen der verfügbaren hohen Drucke und wegen der geringen Masse des Dampfes im Vergleich zu der Masse von Wasser auf sehr hohe Dampfgeschwindigkeiten kommt — 1000 m in der Sekunde und erheblich mehr —, so kommt man auch auf entsprechend hohe Umfangsgeschwindigkeiten des Schaufelrades und auf entsprechend hohe Umlaufzahlen. Die Lavalturbinen laufen daher mit Umlaufzahlen bis zu 30000 Umläufen in der Minute: das Rad dreht sich dann in einer Sekunde 500mal herum! Wie man es dahin bringt, diese allzuhohen Umlaufzahlen auf ein brauchbares Maß, meist auf 3000 in der Minute, herabzudrücken, wird in dem Abschnitt über Dampfturbinen zu besprechen sein. Hier sei nur noch erwähnt, daß man nicht unbedingt den Dampfdruck zunächst in Geschwindigkeit umzusetzen braucht, sondern daß man, wie für Wasser beim Segnerrad, auch den Druck des Dampfes unmittelbar durch die mit einer Ablenkung verbundene Reaktion auf einen Schaufelkranz wirken lassen kann. Freistrahl- und Reaktions-Dampfturbinen unterscheiden sich daher voneinander genau so, wie das Peltonrad sich vom Segnerrad unterscheidet, wenn auch der Unterschied der Wirkung nicht so anschaulich wie bei jenen einfachen Vorrichtungen in die Erscheinung tritt.



Abbild. 48. Laufrad mit Düsensatz einer Laval-Dampfturbine. Ältere, nicht mehr ausgeführte Bauart. Aus dem Außenkranz ein Stück herausgenommen, und eine Düse durchscheinend gedacht. Maschinenbau-Anstalt Humboldt, Cöln-Kalk.

Nicht nur der Kraftzylinder, sondern auch die Speisepumpe der Abbildung 46 kann durch eine umlaufende Maschine ersetzt werden; in den letzten Jahren verwendet man Kreiselrad-Speisepumpen. Abbild. 49 zeigt eine moderne Dampfturbine und die zugehörige Speisepumpe

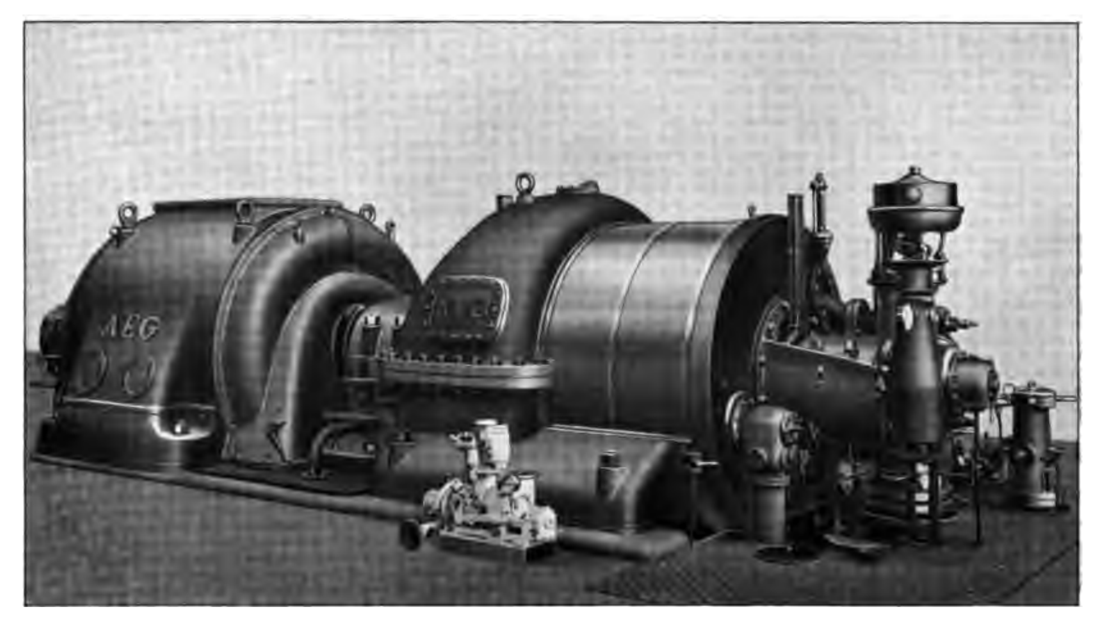


Abbildung 49. Dampfturbine mit Dynamomaschine von 12000 Kilowatt Leistung; davor die zugehörige Speisepumpe, ebenfalls mit Dampfturbinenantrieb, zum Vergleich der Größenverhältnisse. Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft, Berlin.

und läßt, sogar noch charakteristischer als Abbildung 46, die gegenseitigen Größenverhältnisse hervortreten: wie klein die arbeitverbrauchende Speisepumpe gegenüber der arbeitleistenden Turbine wird.

Die Gasturbine, von der man in letzter Zeit wohl spricht, ist eine mit umlaufendem Kompressor und mit umlaufender Luftturbine an Stelle der Kolben und Zylinder ausgestattete Heißluft- oder Gasmaschine; bei ihr werden die Größenverhältnisse ähnlich ungünstig wie bei der Heißluftmaschine, und diese Tatsache neben manchen praktischen Schwierigkeiten läßt die Gasturbine noch immer nicht als konkurrenzfähig auf dem Feld erscheinen.

Wie wir schon bei den Wasserkraftmaschinen sahen, daß bei aller Mannigfaltigkeit der Umsetzung doch immer das Energiegesetz erhalten bleibt und auf allen Wegen etwa die gleichen Resultate erzielt wurden, so daß mehr äußere Umstände und praktische Rücksichten den Ausschlag für eine bestimmte Maschinengattung geben — ebenso läßt sich auch bei einem Vergleich der Kolbenmaschinen und Dampfturbinen untereinander und bei letzteren wieder bei einem Vergleich der Freistrahl- und der Reaktionsturbinen sagen, daß auf jede Weise die gleichen Ergebnisse theoretisch erzielt werden müssen. Alle Unterschiede können sich nur auf praktische Verhältnisse beziehen. So war lange Jahre hindurch der Ausbildung der Dampfturbinen die Tatsache hindernd im Wege, daß man für die hohen Umlaufzahlen keine genügend sicheren Baustoffe, oder für vorzügliche Baustoffe keine genügend billige Werkstattverfahren der Bearbeitung zur Verfügung hatte, um Turbinen im großen herzustellen.

Heutzutage erreicht man mit allen Dampfkraftmaschinenarten etwa das gleiche, wie es theoretisch sein soll, natürlich in allen Fällen von dem theoretisch Möglichen etwas verlierend. Was man etwa erreicht, das soll im sechsten Abschnitt besprochen werden.

5. UNVOLLKOMMENE AUSNUTZBARKEIT DER WÄRME. TECHNISCHE BEDEUTUNG DES ZWEITEN HAUPTSATZES

Wenn wir rückblickend die verschiedenen Arten der Energieumsetzung überschauen, so sehen wir durchweg durch die Erfahrung das Gesetz von der Erhaltung der Energie bestätigt. Wir finden, daß jede Energieform sich in jede beliebige andere umwandeln läßt, und daß jede Umwandlung nach feststehenden Verhältniszahlen vor sich geht — Tatsachen, die man eben unter dem Namen des Energiesatzes zusammenzufassen pflegt.

Immerhin finden wir bei aufmerksamer Betrachtung eine gewisse Vorzugsstellung, die die Wärme anderen Energieformen gegenüber einnimmt. Wir sehen, daß mit einfachsten Mitteln andere Energieformen in Wärme umgesetzt werden können, während es zur Umsetzung der Wärme in andere Energieformen größerer Apparate bedarf. Das gilt am reinsten von der uns hier interessierenden Beziehung zwischen Wärme und Arbeit: wir können durch einfache Reibung aus der Arbeit Wärme erzeugen, müssen aber, um Wärme in Arbeit umzusetzen, Dampfmaschinen oder dergleichen verwenden. Ähnlich beim elektrischen Strom. Elektrische Energie wird in Wärme umgesetzt, wo immer der elektrische Strom einen Leiter durchfließt: jede Glühlampe zeigt die Einfachheit der Umsetzung von elektrischer in Wärmeenergie. Dagegen weiß man, wie unvollkommen man in Thermoelementen Wärme in elektrischen Strom umsetzen kann und welche umständliche Kombination von Dampfkessel, Dampfmaschine und Dynamomaschine nötig ist, um größere Mengen elektrischen Stromes aus Wärme zu erzeugen. Und für Verbrennungsvorgänge finden wir, daß wir nur ein Streichholz an den Brennstoff zu halten brauchen, um die Entzündung einzuleiten, worauf sofort reichlich Wärme entwickelt wird, während die Umwandlung von Wärmeenergie in chemische wieder nur durch sorgsames Führen chemischer Prozesse etwa im Hochofen möglich wird.

Eine so vielfach gültige Tatsache kann nicht wohl einem einfachen Zufall zugeschrieben werden, es scheint sich um eine Gesetzmäßigkeit zu handeln. So führt die genaue Untersuchung, die wir im folgenden nur andeuten können, soweit sie technisch interessiert, auf das wichtige Gesetz, das man als den zweiten Hauptsatz der Wärmelehre zu bezeichnen pflegt.

Als ersten Hauptsatz nämlich bezeichnet man einfach die Tatsache der Äquivalenz von Wärme und Arbeit oder den Energiesatz überhaupt: alle Energieformen sind äquivalent. Der erste Hauptsatz sagt nur, daß die Umsetzungen, *sofern sie vonstatten gehen*, nach den bestimmten Äquivalenzverhältnissen erfolgen. Ob aber unter bestimmten Bedingungen eine Energieumwandlung eintritt und in welcher Richtung, darüber wird nichts gesagt, ebensowenig wird behauptet, daß jede Umwandlung überhaupt möglich sei. Nur die numerischen Verhältnisse wirklich eintretender Umwandlungen werden festgelegt, nicht aber die Bedingungen für das Eintreten. Wenn also das Wasser nicht bergabliefe, so würde das dem ersten Hauptsatz nicht widersprechen — läuft es aber bergab, so muß für die potentielle Energie eine andere Energieform auftreten.

Der Energiesatz in dieser Form ist nichts Vollständiges und bedarf der Vervollständigung. Diese wird ihm durch den zweiten Hauptsatz zuteil, der der Wärme eine Vorzugsstellung zuspricht in dem Sinne, die Energie habe das Bestreben, sich in Wärme zu verwandeln. Er weist den Vorgängen ihre Richtung an.

Der erste Hauptsatz — der Energiesatz — hat technisch die Bedeutung, daß er die Konstruktion des Perpetuum mobile ausschließt. Der zweite Hauptsatz ist von *Clausius*

Maschinenversuchslaboratorium.

Zu Gramberg: Die Umsetzung und Verwertung der Energie in Maschinen.

in der Form ausgesprochen worden: Wärme kann nicht von selbst von einem kälteren auf einen wärmeren Körper übergehen. Dieser so selbstverständlich klingende Satz hat weitergehende Konsequenzen als man ihm zunächst ansieht. Technisch folgt aus ihm insbesondere, daß es aussichtslos ist, nach Anordnungen zu suchen, die man nach Ostwald als Perpetuum mobile zweiter Art bezeichnet. Man könnte nämlich Arbeit zwar nicht aus dem Nichts, aber doch aus der in beliebiger Menge überall verfügbaren Wärme unserer Umgebung ziehen wollen. Dadurch würde sich die Umgebung abkühlen, und wir hätten zwei Vorteile: neben dem kostenlosen Arbeitsgewinn noch eine Kühlwirkung. — Solcher Anordnung steht nicht der Energiesatz, wohl aber der zweite Hauptsatz entgegen. Denn der von selbst erfolgende Wärmeübergang in der Richtung zum wärmeren Körper würde Temperaturdifferenzen schaffen, die wir unter Anwendung von Kreisprozessen zum Betrieb von Wärmekraftmaschinen ausnutzen könnten. Wenn wir aber die Tatsache, solche Anordnung sei unmöglich, — leider — anerkennen müssen, so folgt daraus streng logisch eine Fülle von anderen Tatsachen, von denen wir nur einige der technisch wichtigsten anführen können, ohne daß der zwingende Zusammenhang mit dem zweiten Hauptsatz bei der Knappheit des Raumes immer klar werden wird.

Wir gingen von der Erfahrungstatsache aus, daß die Umwandlung in Wärme mit einfacheren Mitteln zu erreichen ist als die entgegengesetzte, daß sie sogar von selbst, ohne und gegen unseren Willen, überall vonstatten geht. Hinzu tritt die weitere Erfahrungstatsache, daß sich andere Energieformen vollständig in Wärme umwandeln lassen, während Wärme nur zu einem meist kleinen Bruchteil, niemals ganz in eine der anderen Energieformen verwandelt werden kann.* Beides widerspricht nicht dem Satz von der Äquivalenz der Energieformen, beschränkt ihn aber.

Wir wollen uns zunächst davon überzeugen, daß sich nicht alle Wärme in Arbeit umwandeln läßt. Wir erinnern uns, daß wir bei allen besprochenen Kreisprozessen Wärme einerseits zu-, anderseits abführten. Welchen der Kreisprozesse wir betrachten, stets trifft das zu, und vor allem: es läßt sich nicht vermeiden. Es liegt in allen Fällen (etwa bei Abbildung 39) in der Natur der Umstände, daß wir auf eine höhere Temperatur kommen müssen, wenn wir komprimiert, dann Wärme zugeführt und dann expandiert haben; denn auf die Anfangstemperatur wären wir gekommen, wenn wir ohne zwischenliegende Wärmezufuhr die Kompression direkt durch die Expansion rückgängig gemacht hätten. Das ist auch nicht anders bei den Kreisprozessen, die wir mit Dämpfen statt mit Luft durchführen, bei denen also die latente Wärme im Spiel ist. Und man kann die Kreisprozesse abändern wie man will, ohne Wärmeabfuhr kommt man nicht aus, der Kreisprozeß schließt sich sonst nicht.

Nach dem zweiten Hauptsatz ist nun die Ausnutzbarkeit der Wärme zur Arbeitserzeugung um so größer, bei je höherer Temperatur die Wärme zur Verfügung steht, und anderseits bis zu einer je tieferen Temperatur hinab man die Wärme auszunutzen in der Lage ist. Wenn man die Temperaturen absolut angibt, indem man zur Celsiustemperatur 273° hinzuzählt, so daß also der Nullpunkt der Skala nicht beim Gefrierpunkt des Wassers liegt, sondern 273° tiefer, und wenn man die absoluten Temperaturen mit T bezeichnet, dann folgt aus dem zweiten Hauptsatz, es könne von der bei einer Temperatur T_1 zur Verfügung stehenden Wärme der Bruchteil

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

* Wir sprechen nur von den maschinentechnisch in Betracht kommenden Energieformen. Für Strahlungsvorgänge u. a. m. bedürfte manches Gesagte der Einschränkung.

ausgenutzt werden, sofern die Wärme bis zur Temperatur T_2 ausgenutzt werden kann. Es kommt also darauf an, ein möglichst großes Temperaturgefälle $T_1 - T_2$ zur Verfügung zu haben.

Nehmen wir ein Beispiel: Wenn einer Dampfmaschine der Dampf überhitzt auf $250^0\,C = 250 + 273 = 523^0$ absolut zugeführt wird, und wenn das Kühlwasser, mit dessen Hilfe man (in der Kondensation) die verbleibende Wärme abführt, $20^0\,C = 293^0$ abs. hat, dann kann man nur

$$\eta = \frac{523 - 293}{523} = \frac{230}{523} = 0{,}44$$

der im Dampf steckenden Wärme in indizierte Arbeit umsetzen; es ist theoretisch unmöglich, daß der „thermische Wirkungsgrad" über 44 % steigt; er wird praktisch erheblich dahinter zurückbleiben.

Wenn also in der Dampfmaschine 22 % der Wärme als indizierte Arbeit geleistet werden, dann ist das nicht so ungünstig, wie es scheint, sondern es wird immerhin die Hälfte dessen umgesetzt, was der Umsetzung fähig ist: man sagt, der Gütegrad der Umsetzung sei 50 %.

Die Erklärung für die zunächst sonderbar anmutende Tatsache, daß nicht alle Wärme in Arbeit verwandelt werden kann, liegt in folgendem: man muß bei allen Energieformen zwischen dem Energieinhalt eines Körpers schlechtweg und zwischen dem ausnutzbaren Energieinhalt unterscheiden. Wir sahen das schon bei Besprechung der Energie, die bei Volumenänderungen aus Gasen gezogen werden kann; an Abbildung 28 erläuterten wir, daß die Volumenenergie der Gase nicht ganz, sondern nur bis zum Druckausgleich mit der äußeren Atmosphäre ausgenutzt werden kann. Aber auch andere Beispiele lassen sich anführen: der fahrende Eisenbahnzug enthält kinetische Energie, die wir, die Masse mit M und die Geschwindigkeit mit W bezeichnet, durch den Ausdruck $\frac{1}{2} M W^2$ wiedergeben, und die wir in dieser Höhe ausnutzen können. Ist denn aber durch diesen Ausdruck der ganze Inhalt des Zuges an kinetischer Energie dargestellt? Keineswegs, wenn man nämlich bedenkt, daß der Zug sich ja noch mit der Erde zusammen fortbewegt, und daß seine absolute Geschwindigkeit im Raume — sofern man davon überhaupt sprechen kann — eine ganz andere, viel größere ist. Sobald man nun als Inhalt an kinetischer Energie denjenigen setzt, der sich aus der absoluten Geschwindigkeit im Raume berechnet, so würde man auch hier zu dem Resultat kommen, es sei nicht alle kinetische Energie umsetzbar, sondern nur derjenige Bruchteil, der bis zum Ausgleich der Geschwindigkeit des Zuges und der Erde gegeneinander umgesetzt ist. Ist also W_1 die absolute Geschwindigkeit des fahrenden Zuges, der übrigens gerade in Richtung der Erdbewegung fahre, und W_2 die Geschwindigkeit der Erde, so würde

$$\eta = \frac{W_1^2 - W_2^2}{W_1^2}$$

den theoretisch ausnutzbaren Bruchteil des ursprünglichen Inhalts an kinetischer Energie darstellen.

Die Ähnlichkeit dieses Ausdrucks mit dem für den erreichbaren thermischen Wirkungsgrad springt in die Augen, zumal wenn wir bedenken, daß bei der Wärme die Temperatur auch wieder diejenige Größe ist, deren Ausgleich das Ende der Ausnutzbarkeit bezeichnet und auf deren Differenzierung die Ausnutzbarkeit beruht.

Ähnlich liegt es mit anderen Energieformen. Wir haben eine Energiequelle, wo Wasser sich in einer hohen Lage befindet und wo die Umstände günstig dafür sind,

daß es sich dem Erdmittelpunkt nähert und dabei seine potentielle Energie der Lage in Arbeit umwandelt. Wird nun beim Herabsinken des Wassers, das wir vielleicht zum Betrieb von Turbinen nutzbar machen, die gesamte potentielle Energie ausgenutzt, die die Wassermasse enthält? Offenbar nicht; denn die gesamte potentielle Energie ist durch den Abstand vom Erdmittelpunkt gegeben und würde erst durch Herabsinken bis zum Erdmittelpunkt frei. Eine Ausnutzung der ganzen potentiellen Energie ist aber nicht nur praktisch, sondern auch theoretisch unmöglich, da ja das herabsinkende Wasser nur dem Streben nach Ausgleich der Niveauunterschiede folgt, und dieses Streben endet, sobald der Unterwasserspiegel, äußerstenfalls der Meeresspiegel erreicht ist.

Warum wird nun aber gerade bei der Wärme der ganze oder absolute Energiebetrag angegeben, während bei den anderen Energieformen nur der ausnutzbare Betrag von vornherein genannt wird? Diese verschiedenartige Bezeichnungsweise hat sich unwillkürlich im Laufe der Entwicklung unserer Erkenntnisse ergeben und ist selbst ein Ausfluß der Vorzugsstellung der Wärme, gemäß der die Umwandlung in Wärme bequem vonstatten geht, die umgekehrte nur mühsam.

Bei anderen Energieformen entsteht, wenn man den Ausgleich der Energie ohne Arbeitsleistung vor sich gehen läßt, einfach Wärme; deren Menge ist das Äquivalent der ausnutzbaren Energie, die bei diesem Ausgleich verschwindet. Man braucht also nur die entstandene Wärmemenge zu messen, um ebenfalls die Menge umgesetzter ausnutzbarer Energie zu kennen.

Die Messung der ausnutzbaren Wärmeenergie ist nicht in dieser Weise möglich. Wenn sonst ein Energieausgleich stattfindet — der elektrische Strom ohne Arbeitsleistung einen Draht durchfließt, das Wasser herabstürzt, ohne ein Rad zu treiben —, so erfolgt Vernichtung der ausnutzbaren Energie und Überführung des Betrages in Wärmeenergie. Dann muß beim Ausgleich der Wärmeenergie selbst, beim Übergehen der Wärme von einem warmen auf einen kalten Körper durch Leitung, der Vorgang anders aussehen: für die durch den Ausgleich von ihrem Temperaturniveau herabfallende Wärme entsteht neue Wärme. Daher bleibt bei einem Wärmeausgleich die gesamte Wärmemenge unverändert, obwohl die Ausnutzbarkeit durch Ausgleich der Temperaturunterschiede verschwindet. Daher mißt man bei der Wärme die gesamten Energiewerte und hat kein Mittel, den ausnutzbaren Bruchteil zu bestimmen, es sei denn auf dem Wege der Berechnung — umgekehrt wie bei den übrigen Energieformen, bei denen wir nur die ausnutzbaren Energiemengen messen können, nicht aber die gesamte.

NICHT UMKEHRBARE UND UMKEHRBARE VORGÄNGE. Ein auch technisch wichtiger Teil vom Inhalt des zweiten Hauptsatzes ist die Kennzeichnung jedes Energieausgleiches, der ohne Arbeitsleistung vor sich geht und zur Bildung von Wärme führt, als eines „nicht umkehrbaren" oder „irreversiblen" Vorganges.

In der Tat, wenn man elektrische Energie einfach in einem Drahtwiderstand in Wärme übergehen läßt, von der man doch weiß, daß sie nicht ganz in Arbeit zurückverwandelt werden kann, so ist dieser Vorgang eben als „nicht umkehrbar" zu bezeichnen. Und wenn man Preßluft, die an sich zur Arbeitsleistung befähigt ist, einfach ausströmen läßt, so daß sich der Energieinhalt in kinetische Energie umwandelt, weiter zur Bildung von Luftbewegungen führt, bis diese allmählich durch Reibung, also durch Wärmebildung, zur Ruhe kommen, so ist kein Mittel vorhanden, die gebildete Wärmeenergie wieder in die Form von Preßluft zu bringen, jedenfalls wird bei dem Versuch nur der durch den Bruch $\frac{T_1 - T_2}{T_1}$ gegebene kleine Bruchteil der

Energie die rückläufige Verwandlung durchmachen. Und ebensowenig würde es glücken, die beim Bremsen eines Eisenbahnzuges an den Bremsklötzen auf irreversiblem Wege erzeugte Wärme zu verwenden, um den Zug wieder in Gang zu bringen. Hat sich im letzten Falle die Erwärmung auf eine so geringe Eisenmasse erstreckt, daß erhebliche Temperaturdifferenzen entstanden sind, so könnte man zwar erhebliche Bruchteile der gebildeten Wärme nutzbar machen — um so weniger jedoch, je geringer die entstandenen Temperaturen waren, niemals aber alles.

Und wohlverstanden: es sind nicht praktische Schwierigkeiten, die der Ausführung des rückläufigen Prozesses im Wege stehen; nicht nur die äußerliche Unmöglichkeit ist es, die Bremsklötze schnell genug abzuschrauben und sie ihre Wärme auf Wasser übertragen zu lassen, um so mittels einer Dampfmaschine die rückläufige Umsetzung zu erzwingen — es besteht vielmehr eine grundsätzliche Unmöglichkeit, irreversible Prozesse direkt oder auf Umwegen irgendwie rückgängig zu machen: der zweite Hauptsatz steht dem entgegen.

Der physikalische Begriff der Irreversibilität spielt auch in der Maschinentechnik eine maßgebende Rolle: jedes Auftreten irreversibler Vorgänge bedeutet einen Energieverlust, und zwar nicht in dem Sinne, daß die verlorene Energie nicht die gewollte Form angenommen hat, sondern in dem schwereren, daß sie die gewollte Form nicht mehr annehmen kann. Das einzige, was man mit der bei irreversiblen Vorgängen auftretenden Wärme noch machen kann, ist: Heizen. Für jeden Zweck aber, wo man nicht die Wärme selbst brauchen will, ist nur nach Maßgabe der Temperaturverhältnisse eine unvollkommene Nutzbarmachung noch möglich. Clausius hat durch Einführung des Begriffes der Entropie einen Maßstab für den Grad gegeben, in dem ein Prozeß irreversibel ist.

Irreversible Vorgänge sind in Maschinen zu vermeiden — in diesen Satz kann man die Lehre von den Unvollkommenheiten der Maschine geradezu zusammenfassen. Da sich nun die irreversiblen Prozesse leicht aufzählen lassen, wenigstens soweit sie maschinentechnisch wichtig sind, so hat man zugleich einen Überblick über die Verluste, die in Maschinen auftreten und die durchweg zur Wärmebildung führen.

Der technisch wichtigste irreversible Vorgang ist die Reibung, die zu Verlusten in allen bewegten Maschinenteilen führt, die die Lager der Maschinenwelle warm, ja wenn die Schmierung versagt, sogar heiß laufen läßt. Wir bremsen durch Reibung den Straßenbahnwagen, wobei wir seine kinetische Energie in Wärme verwandeln. Wie wenig es dabei auf die Reibung als solche und wie sehr es nur darauf ankommt, durch Anwendung eines beliebigen irreversiblen Vorganges die Energie zu vernichten, sehen wir daran, daß der Führer noch eine Kurzschlußbremse hat: durch passende Schaltung des vom Fahrdraht abgeschalteten Motorankers auf einen Drahtwiderstand wird die kinetische Energie veranlaßt, im Anker elektrische Energie zu erzeugen — dieser Vorgang wäre noch reversibel —, und dann wird der Strom im Drahtwiderstand in Wärme verwandelt, die elektrische Energie irreversibel vernichtet.

Denn die Vernichtung elektrischer Energie in Draht- oder anderen Widerständen ist auch ein irreversibler Vorgang. Man kann sich hier sowenig wie bei der Reibung den umgekehrten Verlauf auch nur vorstellen.

Von mechanischen Vorgängen aber wären noch alle diejenigen Strömungserscheinungen flüssiger, gas- und dampfförmiger Körper zu nennen, die und soweit sie zur tumultuarischen Wirbelbildung führen; da die unregelmäßig rotierende Wirbelbewegung ausnahmslos nur durch die innere Reibung der Flüssigkeit beseitigt wird, so kann man schon sie selbst als irreversibel bezeichnen, wenngleich, streng-

genommen, erst mit dem Übergang in Wärme die Irreversibilität eintritt. Unter diese Gattung von Vorgängen fällt neben der Reibung in Rohrleitungen auch der Stoßverlust, der beim Austritt aus einem engen Querschnitt in ein weiteres Gefäß durch Auftreffen auf die ruhende Masse erfolgt. Daher sind alle Aus- und Einströmvorgänge irreversibel. Der Druckverlust von Gas und Dampf beim Durchgang durch enge Querschnitte, in den Steuerungskanälen der Dampfmaschine, ist ein Verlust, weil er irreversibel ist. Die Irreversibilität tritt ein nicht in dem Moment, wo der Strömungsvorgang zwischen den beiden miteinander verbundenen Räumen einsetzt, sondern erst wenn die kinetische Energie der Strömung durch Stoß vernichtet wird. Dafür ist ein experimenteller Beweis an der Laval-Dampfturbine zu erbringen, indem wir die Dampftemperatur hinter dem Laufrad messen, dabei das Rad erst festhalten, dann schneller und schneller laufen lassen, bis es zuletzt seine Freilauftourenzahl annimmt. Wie für das Peltonrad an Abbildung 24 geschildert, wird dabei die dem Dampf entzogene Leistung von Null beginnend erst zunehmen, bei einer gewissen Umlaufzahl ein Maximum erreichen, um dann wieder abnehmend bei der Freilauftourenzahl Null zu werden — anfangs ist die Umlaufzahl, jetzt das Drehmoment Null, und beider Produkt bedingt die Leistung. Wenn wir hierbei die Temperatur des Dampfstrahls vor und hinter dem Laufrad messen, so finden wir vor dem Laufrad stets die gleiche Temperatur — die Expansion in der Düse ist stets dieselbe. Im Falle der Arbeitsleistung, bei mittlerer Umlaufzahl, ist dem Strahl die kinetische Energie reversibel im Laufrad entzogen, die Temperatur hinter dem Rad ist etwa die gleiche wie davor: Wenn aber bei zu kleiner oder zu großer Geschwindigkeit des Rades der Strahl seine Geschwindigkeit im Rad behält und sie erst dahinter irreversibel durch Auftreffen auf die ruhende Luft durch Wirbelbildung verliert, dann tritt Wärmebildung und Temperaturerhöhung ein: der Verlust an kinetischer Energie führt zur Temperaturerhöhung des Dampfes. Beim Peltonrad würde man bei Anstellung des gleichen Versuches die noch handgreiflichere Beobachtung machen, daß der Strahl fast ruhig zum Boden des Gehäuses abläuft, wenn ihm die Energie entzogen war, sonst aber spritzt er vorn oder hinten gegen die Gehäusewand und zerstäubt: auch das Zerstäuben ist eine Art Wirbelbildung und irreversibel, insofern es schließlich unbedingt zur Wärmebildung führt.

Doch wir kehren zur Aufzählung der irreversiblen Vorgänge zurück. Da ist vor allem der Wärmeübergang vom warmen zum kalten Körper zu nennen, soweit er durch einfache Wärmeleitung oder -strahlung ohne Arbeitsleistung stattfindet. Bei der Aufstellung des zweiten Hauptsatzes ging Clausius, wie wir besprachen, von der Erfahrungstatsache aus, daß Wärme nicht von selbst von einem kälteren zu einem wärmeren Körper übergeht. Als irreversibler Vorgang ist die Wärmeleitung, der Temperaturausgleich ohne Arbeitsleistung, grundsätzlich zu vermeiden. Praktisch ist seine Vermeidung nicht wohl angängig. Beim Dampfkessel wird der hohe Temperaturunterschied, der zwischen Feuergasen und Kesselinhalt besteht, beim Wärmeübergang durch die Kesselwandungen nutzlos preisgegeben, und nur ein kleiner Teil der Verbrennungstemperatur bleibt als Dampftemperatur bestehen. Das ist ein grundsätzlicher Fehler der Dampfkraftanlage gegenüber den mit innerer Verbrennung und daher höheren Temperaturen arbeitenden Verbrennungskraftmaschinen: die Arbeitsfähigkeit der Wärme wird dadurch beeinträchtigt, wie auch eine einfache Rechnung zeigt. Bei 1000^{0} C = 1273^{0} absoluter Temperatur der Feuergase und 20^{0} C = 293^{0} absoluter Temperatur der Umgebung hätten

$$\eta = \frac{1273 - 293}{1273} = 0{,}76$$

oder 76% der durch Verbrennung freigewordenen Wärme zur Umsetzung in Arbeit zur Verfügung gestanden. Nachdem die gleiche — bei der Wärmeleitung unverändert bleibende — Wärmemenge auf Dampf von nur 250° C = 523° absoluter Temperatur übertragen ist, können nur noch

$$\eta = \frac{523 - 293}{523} = 0,44$$

oder 44% der Wärme in Arbeit verwandelt werden.

Der Begriff der Umkehrbarkeit und Nichtumkehrbarkeit ist deshalb auch technisch so wichtig, weil die Unterscheidung ein Kennzeichen dafür liefert, ob mit einem Vorgang Verluste verbunden sind oder nicht. Bei der Dampf- und der Gasmaschine hat der Inhalt des Maschinenzylinders abwechselnd verschiedene Temperaturen und steht dabei mit den Zylinderwandungen in Berührung, daher findet Wärmeaustausch zwischen Wärmeträger und Wandung statt. Man könnte im Zweifel sein, ob das ein Fehler ist: der Nachweis, daß mit den Wandungseinflüssen Verluste verknüpft sind, ist seinerzeit, namentlich von Hirn, umständlich erbracht worden. Heute könnte man die Frage schon mit dem einfachen Hinweis darauf beantworten, daß es sich ja um Wärmeleitung, also um einen irreversiblen Vorgang handelt — also sind damit Verluste verknüpft.

Trotzdem kann der Nachweis, wie die Verluste zustande kommen, im Einzelfall interessieren. Aber das allgemeine Prinzip läßt uns den Überblick behalten und bewahrt vor Fehlschlüssen. So wie keine Einzelüberlegung auf ein Ergebnis führen darf, das dem Energiegesetz widerspricht, so auch nicht auf eins, das dem zweiten Hauptsatz widerspricht. Denn der zweite Hauptsatz ist ein Gesetz, das wir als allgemeingültig ansehen dürfen, weil keine Erfahrung ihm widerspricht, und weil er unsere Erfahrungen widerspruchslos unter einen großen Gesichtspunkt zu ordnen gestattet. Er steht dem Energiesatz als ebenbürtig zur Seite, wenn er auch weniger allgemein bekannt, weil schwieriger zu erfassen ist. —

Die eben aufgezählten Vorgänge bezeichneten wir als irreversibel, indem wir es als Erfahrungstatsache hinstellten, daß sie nicht vollständig rückgängig gemacht werden können. Dagegen sollen die Umwandlungen, die wir sonst besprochen haben, umkehrbar sein. Das sind sie in der Tat. Wenn man die Dynamomaschine benutzt, um Arbeit in elektrischen Strom zu verwandeln, so ist es wohl bekannt, daß wir jede Dynamomaschine sofort als Motor laufen lassen können, indem wir ihr (unter entsprechender Schaltung) elektrische Energie zuführen, die sie dann in einer genau der Wirksamkeit der Dynamomaschine entsprechenden, jedoch in umgekehrter Weise in Arbeit verwandelt. Daß man freilich, wenn man zunächst die Leistung einer Dampfmaschine in Elektrizität umsetzt, diese fortleitet und den elektrischen Strom in Arbeit zurückverwandelt, eine geringere Leistung erhält, als die Dampfmaschine lieferte, ist natürlich. Es ist aber nicht theoretisch bedingt. Es liegt nur daran, daß die Dynamomaschine, das Leitungsnetz und der Elektromotor mit Verlusten arbeiten: sie alle werden vom Strom durchflossen; stromdurchflossene Leiter erwärmen sich aber bekanntlich, indem sich Elektrizität in Wärme verwandelt. Auch haben die Maschinen Reibung. Es finden also auch in der Dynamomaschine und im Elektromotor irreversible Vorgänge statt, die sich aber theoretisch beliebig weit einschränken lassen, praktisch immerhin veranlassen, daß der Wirkungsgrad dieser Maschinen unter Eins bleibt. Man könnte die Wärmeerzeugung einschränken, indem man stärkere Leitungsquerschnitte verwendet, die sich dann freilich nicht gut in der Maschine unterbringen lassen, auch würden die Leitungen, weil aus Kupfer bestehend, zu teuer werden —

aber alles dies sind keine theoretischen Hindernisse. Grundsätzlich ist die Rückverwandlung vollkommen und verlustlos möglich.

Ebenso sind die Kraftmaschinen umkehrbar: wir brauchen nur einer gewöhnlichen Turbine Arbeit mittels Riemens zuzuführen, und sie wirkt alsbald als Wasserpumpe, wenn es sich um eine Wasserturbine handelt; sie pumpt Dampf oder Luft — was man ihr zuführt —, wenn es sich um eine Dampfturbine handelt. Während also vorher der Druck oder das Gefälle des Wassers ausgenutzt wurde, um in der Turbine Arbeit zu erzeugen, wird jetzt in der Pumpe die mechanische Arbeit dazu verwendet, um das Wasser wieder in die Höhe zu heben, den Dampf in den Dampfkessel zurückzudrücken oder, da man das wohl nicht tun wird, um Luft in einen Luftbehälter zu drücken. Und auch hier gilt, was wir von den elektrischen Maschinen sagten: die Rückverwandlung ist theoretisch verlustlos möglich und würde restlos vonstatten gehen, wenn nicht in der Turbine einerseits, in der Pumpe anderseits Reibungsverluste auftreten, wenn also alle irreversiblen Vorgänge vermieden würden. Diesem Ziel kommt man mit fortschreitender theoretischer Erkenntnis immer näher. Auch die Tatsache übrigens, daß man in Wirklichkeit nicht einfach eine Turbine hinstellt und antreibt, wo man Wasser pumpen will, sondern daß die Wasserpumpen äußerlich ganz anders aussehen als die Turbinen, spricht nicht dafür, daß die Umkehrung nicht möglich ist, sondern nur dafür, daß die Kraftmaschine einerseits, die Arbeitsmaschine anderseits verschiedener Ausgestaltung bedürfen, um die Verluste möglichst herabzudrücken.

Wenden wir uns zur Kolbenmaschine, so kann auch die arbeitleistende Dampfmaschine ohne weiteres Dampf in den Kessel zurückdrücken oder, was wohl häufiger vorkommen wird, als Luftkompressor verwendet werden, sobald man ihr Arbeit zuführt, statt solche von ihr erhalten zu wollen. Die Wassersäulenmaschine ist, wie wir besprachen, wenig im Gebrauch, ihre Umkehrung aber, die mit Kolben arbeitende Wasserpumpe, ist eine wichtige Maschinengattung und wird erst in neuerer Zeit durch Kreisel- (Zentrifugal-) Pumpen verdrängt, ähnlich wie die Kolbendampfmaschine vielfach der rein umlaufenden Dampfturbine das Feld räumen muß.

Diese und andere Prozesse sind also ohne weiteres umkehrbar. Doch ist es gar nicht nötig, daß man gerade mit Hilfe der gleichen Maschine den umgekehrten Prozeß vornehmen kann: ein Peltonrad wird man beispielsweise nicht zum Wasserfördern verwenden können und wird trotzdem seine Arbeitsweise als reversibel bezeichnen, weil man ja mit anderen Mitteln zum Ziele kommt. Von irreversiblen Prozessen aber wird behauptet und durch die Erfahrung bewiesen, daß sie auf keine Weise ganz rückgängig gemacht werden können, auch nicht auf irgendwelchen Umwegen. Das ist ein grundsätzlicher Unterschied.

KÜHLANLAGE ALS UMKEHRUNG DER KRAFTANLAGE. Den Wärmeübergang vom wärmeren zum kälteren Körper bezeichneten wir als nicht umkehrbar, sofern er ohne Arbeitsleistung durch einfache Wärmeleitung vonstatten geht. Anderseits bezeichneten wir die zur Arbeitserzeugung benutzten Kreisprozesse, bei denen Wärme unter Arbeitsleistung von wärmeren auf kältere Körper übergeht — z. B. vom Dampf auf das Kühlwasser der Kondensation — als (grundsätzlich) umkehrbar. Nun wäre die Frage, was denn herauskommt, wenn wir die Kreisprozesse, die uns in den Wärme-Kraftmaschinen Arbeit liefern, wirklich umgekehrt ausführen lassen. Wir erhalten dadurch eine Kühlanlage.

Zur Arbeitserzeugung ließen wir den Kreisprozeß in der Weise verlaufen, daß wir etwa Luft (Abbild. 39 und 43c) zunächst komprimierten, wobei die Temperatur stieg,

dann auf diesem höheren Temperaturniveau Wärme zuführten, weiterhin die Luft sich ausdehnen ließen, wobei sie zugleich sich wieder abkühlte, indem Wärme sich in Arbeit verwandelte, und nun mußten wir die verbliebene Wärme abführen. Weil wir Arbeit erzeugt hatten, war die abgeführte Wärmemenge kleiner als die zugeführte: kleiner um das Äquivalent der erzeugten Arbeit.

Kehren wir den Kreisprozeß um, so verläuft er folgendermaßen (Abbildung 50). Wir saugen Luft von Atmosphärenspannung an, diesmal aber ein solches Quantum, wie früher der Größe des Arbeitszylinders entsprach (bis D). Wir komprimieren die Luft (Linie DC), sie wird sich erhitzen; wir kommen dadurch auf ein höheres Temperaturniveau und können nun, während wir früher auf dem höheren Temperaturniveau Wärme zuführten, statt dessen Wärme abführen, also die durch Kompression erhitzte Luft mittels Kühlwassers kühlen. Wir schicken dazu die komprimierte Luft durch einen Kühler. Das Volumen vermindert sich, und wir haben dann komprimierte, hochgespannte Luft von der Temperatur des Kühlwassers. Lassen wir diese unter Arbeitsleistung in einem zweiten, kleineren Zylinder, der dem früheren Kompressionszylinder entspricht, expandieren, so wird sich die Luft nun abkühlen, und da sie schon vorher auf die Temperatur der Umgebung heruntergekühlt war, so kommen wir am Ende des Expansionsvorganges unter die Temperatur der Umgebung herunter: wir erhalten Kälte. Wir führen der nun sehr kalten Luft die Wärmemenge wieder zu, die wir ihr vorher mittels des Kühlwassers entzogen hatten, und veranlassen dadurch, daß wir wieder auf den Ausgangspunkt des Diagramms zurückkommen. Diese Wärmezuführung machen wir in der Weise, daß wir die Wärme demjenigen Raume oder den Gegenständen entziehen, die wir kühlen wollen. Denn Kühlung ist ja nichts als Entziehung von Wärme auf einem Temperaturniveau unterhalb der Temperatur der Umgebung.

Der ganze in der Kühlanlage sich abspielende Prozeß ist also genau eine Umkehrung des in einer Kraftmaschine sich abspielenden Vorganges. Daher werden wir diesmal Arbeit verbrauchen, da wir in der Kraftmaschine solche gewinnen: um Kälte zu erzeugen, ist Arbeit aufzuwenden.

Daß die Kühlmaschine in der Tat eine Umkehrung der Wärmekraftmaschine ist, tritt recht deutlich in die Erscheinung, wenn man eine Kaltluftmaschine betrachtet (Abbild. 51). Es sind die äußeren Formen jener Heißluftmaschine, die wir früher in Abbild. 41 kennen lernten, beibehalten, um den Vergleich der einzelnen Bauteile bei beiden Maschinenarten zu erleichtern; auch wird für Kaltluftmaschinen die Balancieranordnung wohl noch gewählt, soweit man überhaupt noch Kaltluftmaschinen ausführt.

Abbildung 50. Kreisprozeß der Kaltluftmaschine als Umkehrung des in Abb. 43c dargestellten Kreisprozesses der Heißluftmaschine.

Die Kaltluftmaschine hat wie die Heißluftmaschine einen Kompressions- und einen Arbeitszylinder, diesmal aber ist der Kompressionszylinder der größere. Die Luft macht den entgegengesetzten Weg wie bei der Heißluftmaschine. Sie tritt daher zunächst in den linken der beiden vorhandenen Zylinder, wird durch ein selbsttätiges Saugventil e hindurch angesaugt, durch ein Druckventil a nach erfolgter Kompression aus ihm herausgedrückt. Dabei erwärmt sich die Luft, wie immer beim Komprimieren. Die heiße hochgespannte Luft wird gekühlt, indem man sie durch einen Kühler schickt. Als solcher ist ein schmiedeeiserner Behälter gezeichnet, in dem sich eine von Wasser durchflossene Kühlschlange

befindet. Der Kühler entspricht dem Ofen der Heißluftmaschine. Die Luft kühlt sich im Kühler auf die Temperatur des Kühlwassers ab, ihr Volumen vermindert sich.

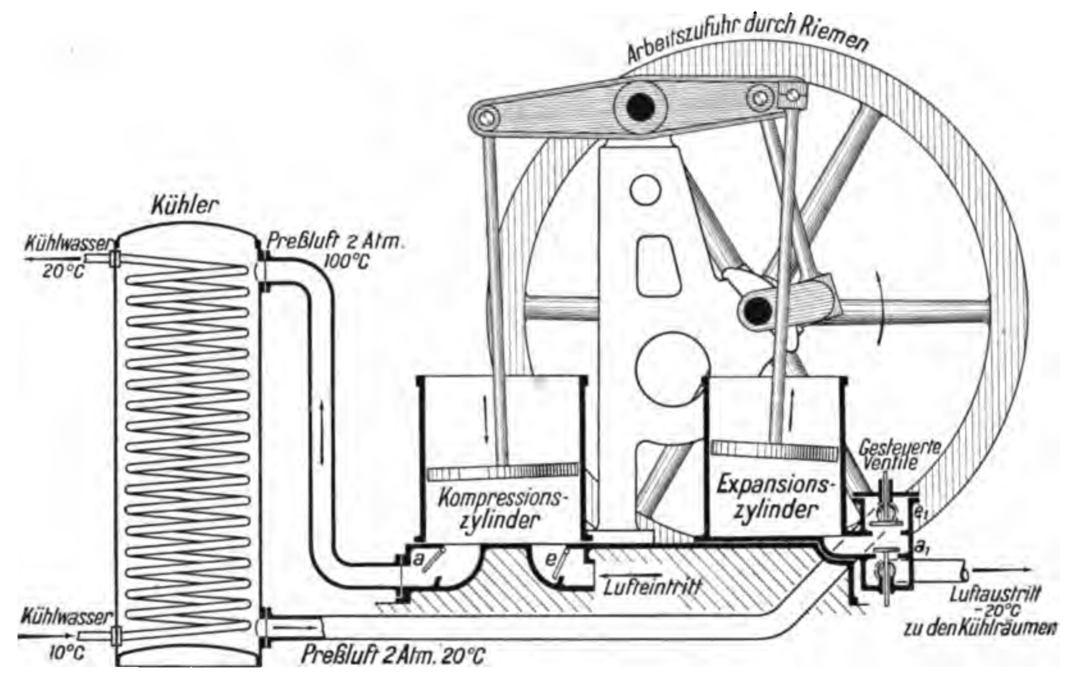


Abbildung 51. Kaltluftmaschine. Der äußere Aufbau läßt die Maschine als Umkehrung der in Abbildung 41 dargestellten Heißluftmaschine erkennen.

Wenn sie nun, durch gesteuerte Ventile in den Arbeitszylinder gelassen, in diesem Arbeit leistet, so ist diese Arbeit kleiner als die vorher aufgewendete, weil, wegen der beim Kühlen eingetretenen Volumenverminderung, die Luft nur noch einen kleineren Zylinder auszufüllen in der Lage ist; der Kolben des Expansionszylinders erhält deshalb einen kleineren Durchmesser. Wenn die Luft hochgespannt und mit der Temperatur des Kühlwassers in den Zylinder tritt, in ihm aber Arbeit leistet, so wird die durch die Arbeitsleistung bedingte Energieentziehung eine Abkühlung bewirken: die Luft tritt mit geringerer Temperatur, als das Kühlwasser sie zur Verfügung stellte, aus dem Luftaustritt rechts aus, an derselben Stelle, wo in der Heißluftmaschine die Luft angesaugt wird. Die kalte Luft geht in die zu kühlenden Räume. Man sieht, es ist in der Tat der umgekehrte Prozeß. Man sieht auch, daß man im ganzen Arbeit zusetzen muß, weil diesmal der kleinere Zylinder Arbeit leistet, der größere solche verbraucht.

Das erscheint manchem zunächst befremdlich; man meint, da es sich ja bei der Kühlung nur um Entziehung von Wärme handelt, so müsse man doch die dem zu kühlenden Raume entnommene Wärme sogar noch in Arbeit umsetzen können, müsse also mit der Kühlwirkung noch einen Arbeitsgewinn haben und also mit der gleichen Maschine zweierlei erreichen können, ohne Aufwand. Wenn diese Vorstellung vom Verhalten einer Kühlanlage richtig wäre, so würde eben das die Konstruktion eines Perpetuum mobile zweiter Art (S. 65) bedeuten, da man nicht die Arbeit aus Nichts erzeugen will, sondern aus der uns zur Verfügung stehenden Wärme unserer Umgebung. Dem Energiegesetz würde solche Anschauung nicht widersprechen. Wohl

aber würde sie sich in Widerspruch setzen mit dem zweiten Hauptsatz. Wir wollen die Temperatur eines Raumes unter diejenige unserer Umgebung bringen, wollen also Temperaturdifferenzen schaffen, und müssen dazu dauernd die Wärme, die dem gekühlten Raume durch seine umgebenden Wände, wie gut sie auch isoliert sein mögen, doch noch zufließt, aus ihm heraus auf das höhere Temperaturniveau der Umgebung heben. Wenn wir die Sache so auffassen, so erkennen wir sofort, daß sich eine Kühlung — soweit uns nicht Kühlwasser oder Eis mit der verlangten Temperatur noch von der Natur zur Verfügung gestellt ist — nur unter Aufwand von Arbeit erzielen läßt. Jener Gedanke, aus der gleichmäßigen Wärme der Umgebung Arbeit zu ziehen, ist, um ein früher (S. 66) schon herangezogenes Bild weiter auszubauen, ebenso absurd, wie wenn man die allen Gegenständen vermöge der Erdbewegung innewohnende kinetische Energie zur Arbeitserzeugung nutzbar machen wollte. Wenn etwa ein Eisenbahnzug gerade auf dem Äquator der Erdbewegung entgegen in Bewegung gesetzt werden soll, so wird, in dem Maße wie die Lokomotive arbeitet und ihn augenscheinlich in Bewegung setzt, in Wirklichkeit sein Inhalt an kinetischer Energie nicht vermehrt, sondern vermindert, da ja seine Geschwindigkeit im Raum um so kleiner wird, je schneller er sich entgegen der Erddrehung bewegt. Aber obwohl wir ihm kinetische Energie „entziehen", müssen wir doch Arbeit aufwenden, um nämlich den Geschwindigkeitsunterschied zwischen dem Zuge und seiner Umgebung zu schaffen.

Oder noch anschaulicher kann ein anderes Bild zum Vergleich dienen. Wollen wir den Grundwasserspiegel in einer Baugrube absenken, so dürfen wir nicht hoffen, durch das Sinken des Spiegels Arbeit zu erhalten. Wir müssen im Gegenteil Arbeit aufwenden, um das Wasser von dem abgesenkten Niveau in der Baugrube so hoch zu heben, daß es ablaufen kann: das Schaffen einer Differenz erfordert Arbeitsaufwand. Auch sinkt ja bei dem Vorgang gar kein Wasser herab, das Arbeit leisten könnte. Nur das Niveau senkt sich, das Wasser aber muß gehoben werden auf das Niveau der Umgebung, das dementsprechend etwas steigt. Wir werden gleich deutlich erkennen, daß auch bei der Kühlanlage nur das Temperaturniveau gesenkt wird; Wärme aber sinkt nicht herab, muß im Gegenteil gehoben werden: sie wird aus den zu kühlenden Räumen in das Kühlwasser hineingehoben, dessen Temperaturniveau höher ist.

Ein Zweites ist bei der Kühlmaschine sonderbar. Der Kreisprozeß einer Kraftmaschine wird rückwärts durchlaufen. Bei der Kraftmaschine wird, wie wir wissen, nur ein kleiner Bruchteil der zugeführten Wärme in Arbeit verwandelt, sagen wir 20 %, der Rest von 80 % muß auf einem zur Arbeitserzeugung zu niedrigem Temperaturniveau wieder abgeführt werden. Kehren wir diesen Vorgang um, so müssen wir 80 Teile Wärme, die wir den zu kühlenden Räumen entnehmen, bei niederer Temperatur in den Kälteträger (bei der Kaltluftmaschine in die Luft) einführen, wir müssen 20 Teile Energie in Form von Arbeit hinzufügen und können dann 100 Teile in Form von Wärme auf dem höheren Temperaturniveau ins Kühlwasser abführen. Die auf niederem Temperaturniveau, im Kühlraum, dem Kälteträger zugeführten 80 Teile sind die Kälteleistung, die wir erstreben; aufzuwenden brauchen wir, um sie zu erzielen, nur 20 Teile als Arbeit: es scheint, als wenn wir mehr gewinnen, als wir aufgewendet haben. In der Tat pflegt man mit 1 PS-st. Kälteleistungen im Betrage von etwa 2500 Kalorien zu erzielen, während 1 PS-st. doch nur 632 Kal. äquivalent ist. Das scheint dem Energiegesetz zu widersprechen. Aber wenn wir den Kreisprozeß aufmerksam betrachten, so werden wir finden, daß der Arbeitsaufwand

gar nicht selbst die Kühlwirkung vollbringt. Die wird vielmehr von dem Kühlwasser geleistet, das bei höherem Temperaturniveau sowohl die dem Kühlraum entzogene

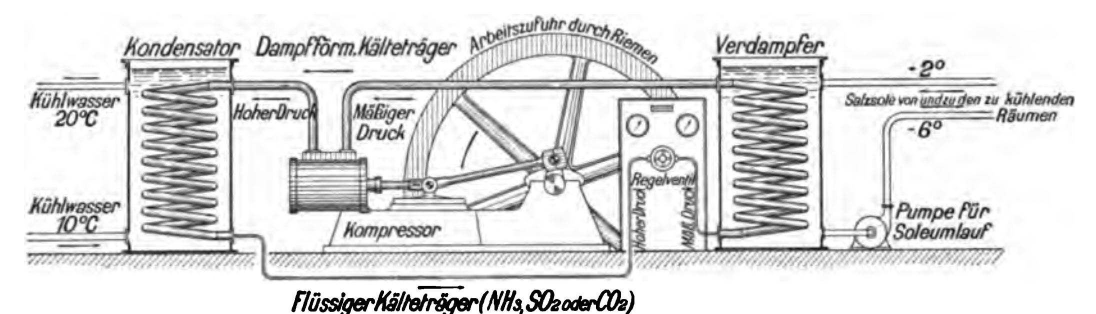


Abbildung 52. Schema einer Kaltdampfmaschine (übliche Kühlmaschine).

Wärme als auch die dem Arbeitsaufwand entsprechende Wärme aufnimmt. Der Arbeitsaufwand ist nur das äußere Mittel, um den Prozeß zum Ablaufen zu bringen. —

Bei der praktischen Ausführung von Kühlanlagen verwendet man meist nicht Luft, sondern andere Kälteträger, am häufigsten Ammoniak, sonst aber auch Kohlensäure und schweflige Säure. Man wählt diese Stoffe, weil sie in den Temperaturgrenzen, zwischen denen die Kreisprozesse verlaufen, sich verflüssigen und wieder verdampfen. Das hat den gleichen Vorteil, der die Verwendung von Wasser und Wasserdampf an Stelle von Luft in der Kraftmaschine als zweckmäßig erscheinen ließ: mit der Bindung und Freisetzung der latenten Wärme ist ein großer Wärmeumsatz verbunden, ohne daß allzu große Volumina umgewälzt zu werden brauchen. Außerdem haben die genannten Stoffe die Eigenschaften, die wir aus Sicherheits- und konstruktiven Gründen bei einem Kälteträger verlangen müssen: sie greifen die Materialien nicht an — schweflige Säure muß freilich trocken gehalten werden, damit sich nicht Schwefelsäure bildet, und Ammoniak greift Bronze an, nicht aber Eisen —, sie sind nicht explosibel, und endlich sind sie nicht so giftig, daß ihre Verwendung deshalb Bedenken begegnen könnte. Der Wärmeträger darf nicht zu kostbar sein — auch das trifft für die genannten zu.

Diese Bedingungen alle würde auch Wasserdampf erfüllen. Ihn verwendet man nicht, weil man meist auf Temperaturen bis nahe an 0° C und gar noch unter 0° herunter kühlen will, wo Wasserdampf zu Eis erstarren und die Rohrleitungen verstopfen würde. Auch hat Wasserdampf bei den niedrigen Temperaturen so kleine Drucke und nimmt daher so große Volumina ein, daß man bei mit Wasserdampf arbeitenden Kühlmaschinen auf zu große Zylinderabmessungen kommen würde.

In allen diesen Hinsichten sind die vorher genannten Kälteträger gerade passend: wenn sich der Kreisprozeß zwischen den Temperaturen von —10 bis +20° C abspielt, so findet die Kompression ungefähr zwischen den Drucken statt, zu denen diese Temperaturen als Siedetemperaturen gehören; Druck und Temperatur hängen ja beim Sieden voneinander ab. Die Kompression findet also bei schwefliger Säure von Atmosphärenspannung auf 2½ Atm. Überdruck, bei Ammoniak von 2 auf 8 Atm., bei Kohlensäure von 26 auf 57 Atm. statt, das sind Drucke, die sich in Maschinen bequem bewältigen lassen. Man bezeichnet die mit Dämpfen arbeitenden Kühlmaschinen als Kaltdampfmaschinen.

Eine gebräuchliche Kühlanlage besteht demnach aus folgenden Bestandteilen, die Abbildung 52 schematisch und Abbildung 53 im Bilde erkennen läßt. Ein Kom-

pressor saugt dampfförmiges Ammoniak von 2 Atm. Spannung an, verdichtet es auf 8 Atm. und drückt es in eine Rohrleitung. Das Ammoniak verflüssigt sich dabei nicht, weil es sich bei der Kompression so weit erhitzt, daß seine Kondensationstemperatur überschritten ist, oder auch deswegen, weil zum Kondensieren Abführung der latenten Wärme nötig wäre, zu der im Kompressor keine Gelegenheit ist. Eine Verflüssigung kann erst eintreten, wenn der Dampf von 8 Atm. Spannung in eine Rohrschlange tritt, die von Kühlwasser umspült wird. Das Kühlwasser kühlt das Ammoniak, entzieht ihm die latente Wärme, und das Ammoniak geht im flüssigen Zustande unten ab; dieser Teil wird deshalb Kondensator genannt, er entspricht dem Kühler der Abbildung 51 oder, wenn man die Kühlmaschine als Umkehrung der Dampfmaschine betrachtet, dem Dampfkessel. Nach dem, was wir vorher gesagt haben, müßte nun das flüssige Ammoniak in einen zweiten Zylinder treten, in dem ein Teil der vom Kompressor aufgewendeten Arbeit zurückgewonnen würde. Dieser Zylinder entspräche dem Expansionszylinder der Kaltluftmaschine oder, im Vergleich mit der Dampfkraftanlage, der Kesselspeisepumpe. Man verzichtet im Interesse einfachen Betriebes und wegen der Geringfügigkeit der zu gewinnenden Arbeit auf den zweiten Zylinder und läßt die Druckverminderung des flüssigen Ammoniaks von 8 auf wieder 2 Atm. nicht in einem Zylinder unter Arbeitsleistung, sondern irreversibel in einem kleinen Drosselventil stattfinden, durch dessen größere oder geringere Öffnung der Ammoniakübertritt aus den Rohren hohen Drucks in die Rohre niederen Drucks geregelt werden kann. Wird die auf der Temperatur des Kühlwassers befindliche Ammoniakflüssigkeit unter geringeren Druck gebracht, so hat sie das Bestreben, zu verdampfen; das kann sie aber nicht gleich am Regelventil tun, weil zum Verdampfen Wärme nötig ist, die sie mangels der erforderlichen Kühlflächen dort nicht aufnehmen kann. Sie kann daher erst verdampfen in der Rohrschlange des Verdampfers, in die sie nun tritt, und die meist von Salzsole umgeben ist, einer Lösung von Kochsalz in Wasser. Diese Sole läuft dauernd, sagen wir mit — 4° C, zu, und wird, indem ihr das Ammoniak durch die Fläche der Kühlschlangen hindurch seine Verdampfungswärme entnimmt, abgekühlt auf, sagen wir — 6°. Die Salzsole wird nun zum Kühlen der zu kühlenden Räume verwendet, in denen Kühlkörper stehen. Die Kühlkörper sehen aus wie die Heizkörper der Zentralheizung. Durch sie wird die Sole mittels einer Pumpe hindurchgedrückt, und in ihnen erwärmt sie sich durch Wärmeaufnahme, also durch Kälteabgabe, von — 6 bis auf wieder — 4° C, worauf sie in den Verdampfer zurückfließt und von neuem abgekühlt wird. Das Ammoniak aber, das im Verdampfer wieder dampfförmige Gestalt angenommen hat, wird vom Kompressor von neuem angesogen, unter Druck gesetzt, wieder gekühlt, und so fort in stetem Kreislauf.

Ammoniak sowohl wie Salzsole laufen dauernd um. Der Grund dafür, daß man nicht das Ammoniak selbst in die Kühlkörper der zu kühlenden Räume sendet, ist mehr äußerlich. Lange, mit Ammoniak unter Druck gefüllte Rohrleitungen sind schwer dauernd so dicht zu halten, daß das Ammoniak nicht austritt und riecht, ja in engen Räumen wegen seiner wenn auch nicht sehr großen Giftigkeit gefährlich werden kann. Man überträgt deshalb die Kälte gern auf einen harmloseren Kälteträger, eben auf Salzsole. Der Salzgehalt derselben soll den Gefrierpunkt des Wassers heruntersetzen; wird ja doch Salz allgemein zum Schneeschmelzen verwendet, weil Salzlösung noch weit unter 0° flüssig bleibt.

Der Bau der Kühlanlagen hat sich erst seit den achtziger Jahren des vorigen Jahrhunderts einigermaßen entwickelt, seitdem man durch Studium der theoretischen Grundlagen erkannt hatte, welche Wärmeträger für die Zwecke der Kühlmaschinen

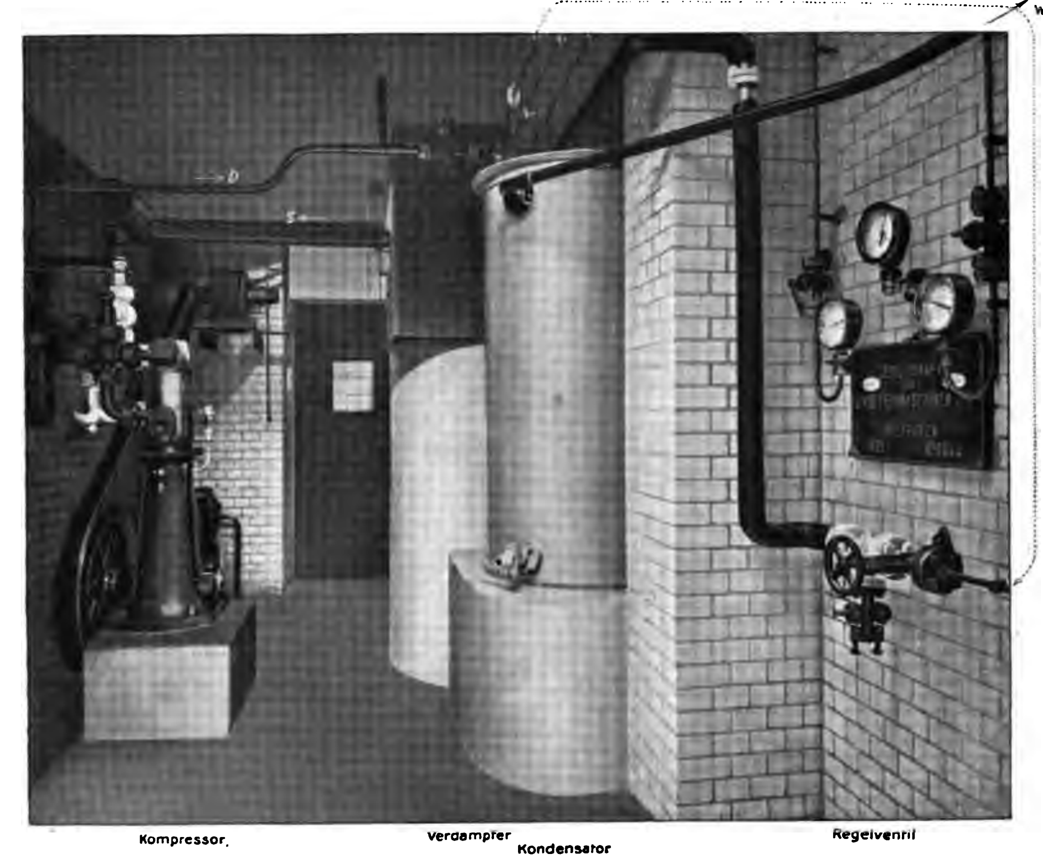


Abbildung 53. Kühlanlage, mit Ammoniak arbeitend, mit elektrisch angetriebenem stehendem Kompressor, zum Kalthalten von Pelzwerk gegen Mottengefahr. S = Saugleitung, D = Druckleitung des Kompressors, beide führen dampfförmiges Ammoniak. Die Rohrteile vom Regelventil durch den Verdampfer zum Kompressor sind, soweit sie nicht mit Korkschalen isoliert sind, mit Eis beschlagen, das der Luftfeuchtigkeit entstammt. — Gesellschaft für Lindes Eismaschinen, Wiesbaden.

geeignet seien und worauf es nach den Lehren des zweiten Hauptsatzes beim Bau der Kühlmaschinen ankommt. Seitdem die Maschinen betriebssicher geworden sind, hat sich die Kälteindustrie gewaltig entwickelt, wovon die in allen Städten vorhandenen Schlachthöfe mit Kühlhallen, die Kühlschiffe zur Versorgung Englands mit australischem Fleisch, zur Versorgung entlegener Gegenden mit Obst und manches andere Zeugnis ablegen. Die Erzeugung der Kälte ist kostspielig: 1000 Kalorien Kälte kosten das Mehrfache von dem, was 1000 Kal. zur Heizung aufgewendeter Wärme kosten; trotzdem machen sich sowohl die Anlagen als auch die Betriebskosten reichlich bezahlt durch die Ersparnisse, die durch Vermeidung verdorbener Nahrungsmittel erzielt werden, Ersparnisse sowohl an Geld als auch an Gesundheit.

Wievielmal teurer Kälte ist als Wärme, dafür ist folgendes ein Beleg. In der Kühlmaschine wird die durch die Anlage aus dem zu kühlenden Raum herausgezogene Wärme auf ein höheres Temperaturniveau gehoben und dem Kühlwasser zugeführt, das sich dadurch erwärmt. Man erwärmt also das Kühlwasser im Kondensator und könnte es zum Heizen verwenden; dabei gilt hinsichtlich der Wärmemenge das, was

wir vorher sagten. Wir berechneten, daß 20 Teile Energie als Kompressorarbeit eingeführt, 80 Teile Energie dem zu kühlenden Raum entzogen, und daß diese 100 Teile dann auf das Kühlwasser als Wärme übertragen wurden. Wollte man also das bei dem Prozeß sich erwärmende Kühlwasser zur Heizung eines Raumes verwenden, so hätte man etwa fünfmal soviel Wärme zur Verfügung, wie der Kompressorleistung äquivalent ist; die überschüssigen vier Teile entstammen dem gekühlten Raume. Trotzdem macht man niemals von einer Kühlmaschine als „Heizmaschine" Gebrauch, obwohl das theoretisch sehr zweckmäßig wäre. Wo man im Gebirge keine Kohlen zum Heizen hat, wohl aber elektrische Energie aus Wasserkräften entnimmt, da heizt man elektrisch, indem man den Strom einfach durch Drahtspiralen schickt und ihn also irreversibel in Wärme verwandelt; man erhält so nur 632 W. E. aus jeder vernichteten Pferdekraftstunde, den Äquivalenzwert. Wenn man statt dessen nicht durch einen irreversiblen Prozeß die Heizwärme neu erzeugte, sondern durch den reversiblen Kreisprozeß der Kühlmaschine vorhandene Wärme von dem niedrigen Temperaturniveau der Umgebung auf das höhere des zu heizenden Raumes höbe, so würde man dem zu heizenden Raume die fünffache Heizwirkung mit dem gleichen Energieaufwand zukommen lassen können. Trotzdem begnügt man sich durchweg mit der irreversiblen Erzeugung der Wärme, die so sehr viel einfacher ist.

6. WIRTSCHAFTLICHE DURCHFÜHRUNG DER KREISPROZESSE IN WÄRMEKRAFTMASCHINEN

Wir sahen, daß man, um Wärme in Arbeit umzusetzen, irgendein Medium, den sogenannten Wärmeträger, einen Kreisprozeß ausführen läßt, bei dem infolge der Ausdehnung und Zusammenziehung der Körper bei der Erwärmung und Abkühlung, insbesondere wenn noch Verdampfungsvorgänge im Spiel sind, mechanische Arbeit frei wird.

Welchen Stoff man als Wärmeträger nimmt, ist an sich ganz gleichgültig. Der Stoff ist eben, nach dem Energiegesetz, nur der Träger der Wärme, und die eigentliche Arbeit wird von der Wärme in den durch den ersten und zweiten Hauptsatz gezogenen Grenzen erzeugt — gleichgültig, welchen Stoff man dazu benutzt. Ähnlich ist es bei Wasserkraftmaschinen: es ist für die Wirksamkeit belanglos, ob wir gerade Wasser zur Verfügung haben; es kommt nur auf das verfügbare Gewicht und Gefälle an, und wir würden, mit Quecksilber arbeitend, aus dem gleichen Gewicht und Gefälle die gleiche Arbeit ziehen. Denn die Flüssigkeit ist nur die Trägerin der Schwerkraftenergie, die wir in der Kraftmaschine ausnutzen und die unter allen Umständen die gleiche Arbeit ergeben kann. Freilich müßte man manches an den Maschinen ändern, bevor sie mit Quecksilber arbeiten könnten, da dies ja ein viel geringeres Volumen hätte als Wasser. — Nun steht uns aber Quecksilber nicht zur Verfügung, auch hätte es betriebstechnisch unbequeme Eigenschaften — gegen keine Flüssigkeit ist so schwer eine Abdichtung zu erzielen wie gegen Quecksilber, und die meisten Metalle werden von ihm angegriffen — also bleibt man natürlich beim Wasser.

So ist auch für Wärmemaschinen theoretisch die Wahl des Wärmeträgers belanglos — praktisch ist sie wichtig und folgenreich.

WASSERDAMPF. Wie die Wahl des Kälteträgers für Kühlmaschinen auf einige bestimmte Stoffe fallen mußte, sahen wir soeben. Ähnliche Rücksichten auf Ungefährlichkeit, chemische Indifferenz und namentlich Billigkeit führen bei der Kraftmaschine auf die Verwendung von Wasser und seinem Dampf. Neben ihm konnte sich Luft nicht behaupten, aus Gründen, die wir durch den Vergleich von Abbildung 46

gegenüber Abbildung 41, sowie aus der Betrachtung von Abbildung 43c und 47 erkannten.

Es scheint auf den ersten Blick ein Einwand gegen die Verwendung des Wasserdampfes zu sein, und dieser Einwand ist es wohl, der das Suchen nach einer brauchbaren Heißluftmaschine um die Mitte des vorigen Jahrhunderts herum veranlaßte, während doch die Dampfmaschine schon ausgebildet war — es scheint ein Einwand zu sein, daß bei der Dampfmaschine der Dampf erst unter Aufwand von Wärme erzeugt werden muß, und man hat es leicht im Gefühl, daß diese Wärme verloren ist. Diese Anschauung ist indessen falsch: im Gegenteil, theoretisch, so lehrt der zweite Hauptsatz der Wärmelehre, führt jeder Kreisprozeß unabhängig von dem verwendeten Medium, auf gleichen Wirkungsgrad, sofern er nur zwischen den gleichen Temperaturgrenzen verläuft, die möglichst weit sein sollten. Praktisch aber ist gerade der mit dem Verdampfen eintretende große Wärmeumsatz ein Vorteil der Dampfmaschine. Dem größeren Wärmeaufwand für Verdampfen der Flüssigkeit steht gegenüber, daß man fast die volle Diagrammfläche des Arbeitszylinders nutzbar erhält (Diagramm Abbild. 47 gegenüber Abbild. 43c), so daß für beide Fälle, gleiche Temperaturen vorausgesetzt, die gleiche Ausnutzung der Wärme gesichert ist.

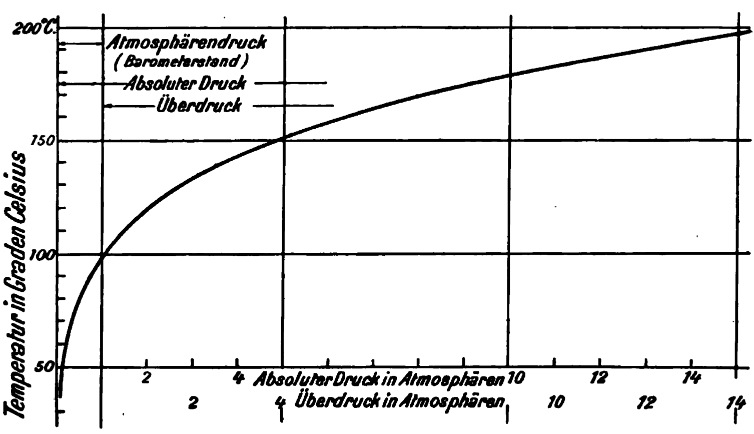


Abbildung 54. Spannungskurve gesättigten Wasserdampfes. (Siedetemperatur des Wassers in Abhängigkeit vom Druck.)

Ist hiernach der Wasserdampf als Wärmeträger der Luft durch seine Eigenschaften und allen anderen in Betracht kommenden verdampfenden Stoffen durch seine Billigkeit so weit überlegen, daß er allein das Feld des Kraftmaschinenbaues beherrscht, so ist er doch kein idealer Wärmeträger. Das geht aus seiner Spannungskurve hervor. Als solche bezeichnet man die Abhängigkeit seiner Siedetemperatur (oder umgekehrt seiner Kondensationstemperatur) vom jeweiligen Druck. Daß das Sieden von Wasser bei niederer Temperatur als bei 100° stattfindet, wenn der Druck geringer als der normale Barometerstand von 760 mm Quecksilbersäule ist, ist bekannt: auf dem Montblanc siedet Wasser wegen des verminderten Luftdrucks schon bei 85° C, und das Bereiten mancher Speisen wird unmöglich. Beim Kochen von Eiern müßte man eigentlich stets das Barometer ablesen, um seinen Stand bei Bemessung der Zeit zu berücksichtigen. Anderseits kocht man gelegentlich unter erhöhtem Druck, um durch die erhöhte Temperatur eine bessere Ausnutzung zu erzielen.

Abbildung 54 gibt nun für Wasserdampf die Beziehung zwischen Druck und Siedetemperatur. Wir sehen, daß bei Atmosphärenspannung das Sieden (oder rückwärts das Kondensieren) bei 100° eintritt. Bei 180° C haben wir bereits einen Überdruck von 10 Atmosphären. Anderseits kommen wir auf Unterdruck, sobald wir unter 100° gehen wollen, und zwar haben wir bei 60° C schon einen Unterdruck von 0,8 Atmosphären — wir müssen 80 % des Luftdrucks beseitigen, um einen Verdampfungs- oder Kondensationsvorgang bei 60° vonstatten gehen zu lassen.

Diese Zahlen charakterisieren das Wasser und seinen Dampf als einen nicht idealen Wärmeträger. Durch sie wird festgelegt, daß man auf unbequeme Verhältnisse kommt, wenn man, den Anforderungen des zweiten Hauptsatzes entsprechend, recht weite Temperaturgrenzen ausnutzen will. Geht man über 200° C hinauf, so kommt man — bei gesättigtem Dampf — auf sehr hohe Drucke, die starke Konstruktionen verlangen. Will man aber unter 100° C herunterkommen, so muß man Vakuum anwenden, zu dessen Erzeugung umständliche Kondensationsanlagen nötig sind.

Mit der einfachen Sattdampf-Auspuffmaschine ist man daher etwa auf die Temperaturgrenzen von 100 bis 200° C beschränkt; das entspricht absoluten Temperaturen von 373 und 473° C, und daher ist der größte theoretisch erzielbare Wirkungsgrad durch

$$\eta = \frac{473 - 373}{473} = 0{,}21.$$

Es können höchstens 21 % der vorhandenen Wärme mittels der Sattdampfmaschine in Arbeit umgesetzt werden.

Dies Ergebnis ist schlechter als das für eine Heißluftmaschine zu errechnende. Natürlich, denn bei jener kann man auf höhere und auf tiefere Temperaturen kommen. Trotzdem überwiegen die Vorteile der Dampfmaschine. Erstens kann man die mit 100° in den Auspuff gehende Wärme noch anderweitig ausnutzen, zumal zu einer Abdampfheizung. Ferner kann man die Temperaturgrenzen erweitern, entweder durch Erhöhen der oberen Temperatur unter Anwendung der Dampfüberhitzung, oder durch Herabziehen der unteren Temperatur unter Einführung des Kondensationsbetriebes.

Diese Möglichkeiten zur Verbesserung des Dampfbetriebes sollen nun besprochen werden; es sei vorweg noch einmal bemerkt, daß alles sich gleichermaßen auf Kolbenmaschinen wie auf Kreiselradmaschinen bezieht, da ja die Art der Umsetzung theoretisch ebenso gleichgültig ist wie die Natur des Wärmeträgers.

DAMPFMASCHINEN. Vorher wollen wir aber sehen, was denn die einfache Dampfmaschine praktisch erreicht.

Man kann leicht nachprüfen, daß wirklich nur ein kleiner Teil der im Dampf enthaltenen Wärmemenge in Arbeit umgesetzt wird.

Wir wissen, daß 1 PS definiert ist als die Leistung, die 75 kg in der Sekunde 1 m hochhebt, das heißt, es ist auf die Stunde bezogen

$$1\ \text{PS} = 75 \cdot 3600\ \text{m-kg/st.} = 270000\ \text{m-kg/st.},$$

oder in Arbeits- statt in Leistungseinheiten: 1 Pferdekraftstunde ist dasselbe wie 270000 Meterkilogramm.

Ferner ist die Kalorie gleichwertig mit 427 m-kg, dem mechanischen Wärmeäquivalent, und aus beiden Beziehungen folgt, daß

$$1\ \text{PS-st.} = \frac{270000}{427} = 632\ \text{Kal.}$$

ist.

Anderseits lehrten physikalische Versuche, die vor etwa 60 Jahren insbesondere von Regnault angestellt wurden und die später im wesentlichen sich bestätigt haben, daß zur Verdampfung von 1 kg Wasser eine Wärmemenge von 600 Kal. aufzuwenden ist. Die Zahl wechselt mit dem Druck und der Temperatur des zu erzeugenden Dampfes, immerhin selbst bei großen Druckunterschieden nicht in allzu weiten Grenzen.

Daraus folgt, daß man mit 1 kg Dampf etwa eine Pferdekraftstunde erzeugen könnte, wenn es möglich wäre, die ganze in Dampf steckende Wärmemenge in Arbeit umzusetzen.

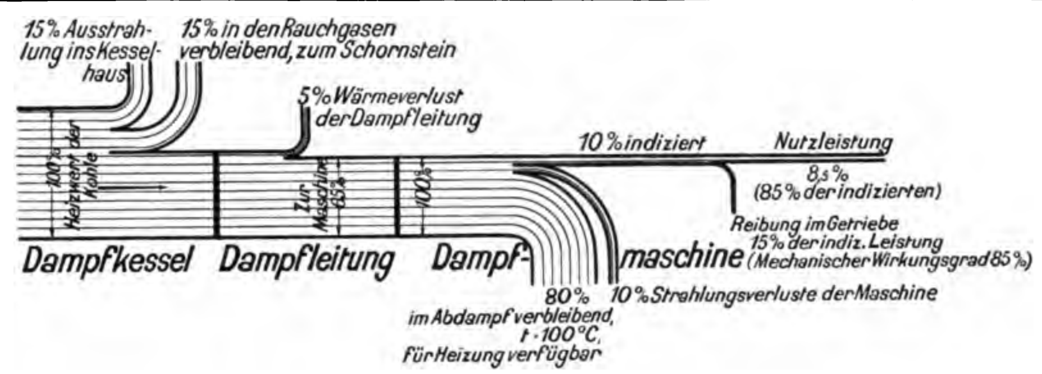


Abbildung 55. Sankey-Diagramm zum Nachweis des Wärmeverbleibs einer Auspuff-Dampfmaschine.

Die Erfahrung lehrt, daß man erheblich mehr Dampf zum Betriebe von Maschinen braucht. Bei Sattdampf-Auspuffmaschinen, das heißt solchen, die den Dampf nach getaner Arbeit in die Atmosphäre ausblasen lassen, wie Lokomotiven es tun, ist der Dampfverbrauch nicht unter etwa 8 kg für die Pferdekraftstunde herunterzudrücken. Also wird nur ein kleiner Teil der im Dampf steckenden Wärme in Arbeit umgesetzt, der Rest ist verloren, wie man zu sagen pflegt. Richtiger sagt man, der Rest macht eben nicht die Energieumwandlung durch, die uns im Augenblick erwünscht ist, sondern behält nach wie vor die Form von Wärme: er steht uns zum Beispiel zum Heizen zur Verfügung.

Daß die Wärme nur bis zur Temperatur von 100° herab ausgenutzt wird, ist ein Fehler der Auspuffmaschine, der zur Folge hat, daß der Wirkungsgrad noch schlechter wird, als er nach dem zweiten Hauptsatz sein müßte; denn wenn wir Dampf von 12 Atm. expandieren lassen, der also mit einer Temperatur von etwa 190° C = 463° absoluter Temperatur zu arbeiten beginnt, und wenn wir ihn bis herunter auf eine Temperatur der Umgebung von 20° C = 293° absoluter Temperatur ausnutzen könnten, so würden wir zwar nicht alle Wärme in Arbeit verwandeln, die dem Dampf aus der Kohle zugeführt war, aber immerhin wäre es theoretisch möglich, eine Umsetzung von $\frac{463-293}{463} = 0{,}37$ oder 37 % der dem Dampf zugeführten Wärme in Arbeit umzusetzen. Wenn man also statt 37 %, wie theoretisch möglich, nur 10 % umsetzt, so ist der Gütegrad der Umsetzung nur ein mäßiger. Er ist nicht mehr als $\frac{10}{37} = 0{,}27$. Wir bezeichneten schon früher mit dem Namen des Gütegrades einer Maschine die Angabe, wieviel von der theoretisch umsetzbaren Wärme wirklich umgesetzt worden ist, und man wird erkennen, daß der Gütegrad in gewissem Sinne ein besserer Maßstab für die Wirkungsweise der Maschine ist als der Wirkungsgrad, dessen Angabe bei Wärmekraftmaschinen an dem Fehler krankt, daß theoretisch eine vollkommene Umsetzung überhaupt nicht möglich ist.

Es ist lehrreich, zu verfolgen, wie der gesamte Energieumsatz in einer modernen Dampfkraftanlage sich gestaltet. Man pflegt wohl die Verhältnisse in Form eines Diagramms wiederzugeben, wie es von dem Amerikaner Sankey angegeben wurde. Man stellt nämlich die Energie, die ja in ihrem Gesamtwert unveränderlich ist, dar als einen Strom, von dem hier und da Zweigströme abzweigen, die nutzbar werden oder nutzlos verloren gehen. Abbildung 55 zeigt das Sankey-Diagramm einer einfachen Dampfmaschine — Kolbenmaschine oder Dampfturbine.

Im Kessel entspringt ein breiter Energiestrom, herrührend von der Wärme, die die auf dem Rost verbrennende Kohle erzeugt. Nicht die ganze Wärme wird auf den Dampf übertragen, auch der Kessel arbeitet mit Verlusten. Immerhin pflegt der Wirkungsgrad guter Kessel ein befriedigender zu sein. So sehen wir denn 70% der auf dem Rost verfügbaren Wärmemenge den Kessel im Dampf verlassen, über die restlichen 30% läßt sich auch leicht Auskunft geben. Etwa die Hälfte davon, also 15%, pflegt in den Schornstein und daher verloren zu gehen. Sind ja doch die den Kessel verlassenden Feuergase noch warm, da man ihrer Temperatur bedarf, um den Schornsteinzug zu erzeugen. Die übrigen 15% gehen durch Ausstrahlung verloren, wie man sagt; die Kesselwände verlieren soviel durch das Mauerwerk hindurch. Von diesen beiden Verlusten ist der letztere insoweit nutzbar, als er im Winter das Kesselhaus warm hält; der erstere wird wohl noch teilweise — soweit der Schornsteinzug es zuläßt — nutzbar gemacht, indem man mit Hilfe der warmen Kesselabgase irgendwelches Wasser erwärmt, nicht selten das Speisewasser des Kessels „vorwärmt".

Von den 70% der ursprünglich vorhandenen Wärme, die dem Dampf zugeführt worden sind, geht noch ein kleiner Teil verloren, bevor der Dampf an die Maschine kommt, indem die Rohrleitung zwischen dem Kessel und der Maschine, sei sie noch so gut mit Kieselguhr oder Seide isoliert, immerhin etwas Wärme verliert. Zur Dampfmaschine kommen dann etwa 65% von dem, was an Energie in der Kohle steckte. Wir wollen diese Menge, wenn wir fortan die Verluste an der Maschine betrachten, wieder als 100% bezeichnen und die weiteren Verluste in Prozenten dieser der Maschine zugeführten Wärmemenge angeben.

Da ist es denn nur ein kleiner Teil, der den Weg geradeaus nimmt und sich in Arbeit verwandelt, um dessentwillen wir eigentlich die Verbrennung vornehmen. Nicht mehr als etwa 10% der Wärme setzt die Dampfmaschine in indizierte Arbeit um, das sind also nur 6½% der in der Kohle steckenden Wärmemenge. Was wird aus dem noch verbleibenden Rest? Zunächst ist ein kleiner Teil von etwa 5 bis 10% auf die Erwärmung des Maschinenhauses in Ansatz zu bringen. Denn wenn auch die Maschinenzylinder sorgfältig mit Filz isoliert werden — diesen zu verdecken, ist der Zweck der stahlblauen Bleche, mit denen die Maschinenzylinder meist umhüllt sind —, so wird immerhin noch Wärme ins Maschinenhaus ausstrahlen. Ist ja doch jedes Maschinenhaus warm, fühlt sich ja doch jede Maschine, wie gut sie auch isoliert sei, warm an. Der überwiegende Teil der Wärme aber, die verbleibenden etwa 80%, puffen mit dem Dampf in die Atmosphäre aus und gehen somit verloren, wenn man auf ihre Verwendung nicht besonders Rücksicht nimmt.

Trotz dieses mäßigen Ergebnisses und des damit verbundenen hohen Kohlenverbrauchs der Auspuff-Sattdampfmaschine gibt es dennoch Fälle, in der sie am Platze ist, wegen ihrer unübertrefflichen Einfachheit, der Billigkeit ihrer Beschaffung, und weil in manchen Fällen ein geringer Kohlenverbrauch, ein geringer Dampfverbrauch und daher ein guter Wirkungsgrad gar nicht erforderlich ist. Das ist insbesondere der Fall bei Maschinen, deren Abdampf man stets zu Heizzwecken verwenden kann. Ein wichtiges Gebiet, auf dem heute noch trotz aller Verbesserungen der Dampfmaschine die einfachen Auspuffmaschinen mit Recht verwendet werden, ist die Verbindung eines Maschinenbetriebes mit einer Abdampfausnutzung. Der Abdampf der Maschine wird zum Heizen irgendwelcher Heizvorrichtungen verwendet, sei es zum Heizen von Fabrikgebäuden, Wohn- oder Bureauräumen, sei es auch zum Heizen von Kochkesseln, Trockeneinrichtungen und anderen mehr gewerblichen Anlagen. Wie eine Maschinenanlage mit Abdampfausnutzung eingerichtet ist, zeigt Abbildung 56.

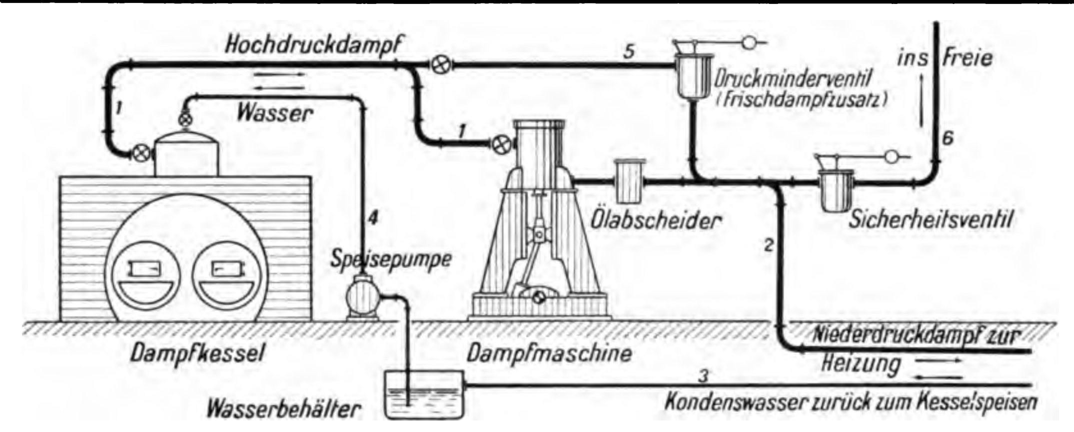


Abbildung 56. Dampfkraftanlage mit Ausnutzung des Abdampfes zur Heizung.

Ein Dampfkessel irgendwelcher Bauart liefert den für den Maschinenbetrieb und zum Heizen erforderlichen Dampf; von ihm geht eine Rohrleitung 1 aus, die zum Zylinder der Dampfmaschine führt. Der Dampf geht vom Kessel zur Maschine mit einem Überdruck, der sich meist zwischen 6 und 12 Atm. hält. Der Auspuffdampf der Maschine geht durch eine andere Rohrleitung 2 zur Heizung, d. h. also zu den Heizkörpern oder Kochgefäßen, in denen er seine Wärme abgeben soll, um sie zu erwärmen. Bevor man den aus der Maschine kommenden Dampf in die Heizung gehen läßt, schickt man ihn erst durch einen Ölabscheider, einen großen Hohlraum, der meist mit durchlochten Blechen durchsetzt ist, so daß der Dampf sich an ihnen stößt und das Öl an ihnen hängenbleibt. Wenn man das Öl nicht aus dem Dampf ausschiede, so würde es die Innenflächen der Heizkörper verunreinigen, deren Reinigung schwierig wäre. Für die Heizung steht noch, wie wir schon wissen, der größte Teil der vom Kessel nutzbar gemachten Wärmemenge zur Verfügung, da nur ein kleiner Teil in der Dampfmaschine in Arbeit verwandelt worden ist. Denn man darf nicht einwenden, der Dampf habe ursprünglich 12 Atm. Druck gehabt, habe nach Durchlaufen der Dampfmaschine aber nur noch Atmosphärendruck. Aus dieser Tatsache folgt nur seine Unverwendbarkeit zur Arbeitsleistung, der Wärmeinhalt schwachgespannten Dampfes ist aber kaum kleiner als der von hochgespanntem. Es sind in jedem Fall etwa 80 % der ursprünglich im Dampf steckenden Wärme noch übrig.

Was auch in der Heizanlage mit dem Dampf geheizt werde, jedenfalls wird ihm die latente Wärme entzogen, und das bewirkt, daß er sich niederschlägt. Das aus ihm sich bildende Kondensat läßt man manchmal fortlaufen. Meist aber sammelt man es in einem Kondenswasserbehälter; von hier drückt es eine Speisepumpe durch Leitung 4 in den Kessel zurück. So vollführt das Wasser immer wieder den gleichen Kreislauf, es kommt kein frisches Wasser in den Kessel, und Kesselstein wird vermieden.

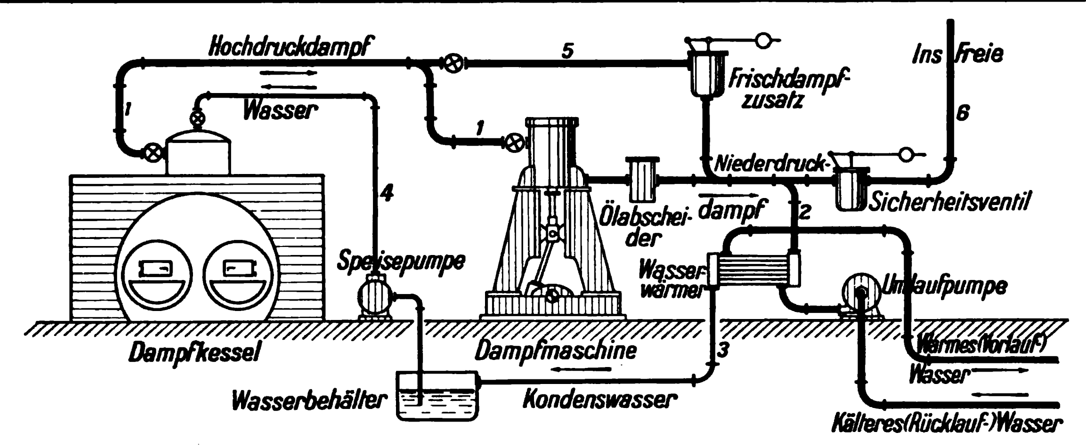
Einer weiteren Vorrichtung bedürfen wir noch. Es bleibt zu bedenken, daß nicht immer die Heizanlage gerade so viel Dampf verbraucht, wie die Maschine hergibt. Beides hängt ja von durchaus verschiedenen Umständen ab. Nehmen wir an, die Dampfmaschine treibe eine Dynamomaschine, und diese versorge ein Krankenhaus mit Licht, so wird die stärkste Belastung der Maschine, ihr größter Dampfverbrauch und auch ihre größte Dampfabgabe in die Zeit fallen, wo der stärkste Lichtbedarf ist. Das ist nun der Tageszeit nach jedenfalls in den Abendstunden, vom Dunkelwerden

bis etwa neun Uhr; der Jahreszeit nach gerechnet, wird die Beleuchtung am längsten gebraucht zu der Zeit, wo die Tage am kürzesten sind, also um Weihnachten herum. Dagegen wird im Sommer der Lichtbedarf nur kurze Zeit am Tage andauern, in nördlichen Gegenden unter Umständen ganz fortfallen.

Anders verteilt sich der Wärmebedarf der Heizanlagen, die mit dem Abdampf der Maschine gespeist werden sollen und die das Krankenhaus zu erwärmen, auch wohl Badewasser und warmes Wasser für die Küche zu liefern haben. Auf die Tageszeit bezogen, wird der größte Wärmebedarf meist in die Vormittagsstunden fallen; denn nachdem man nachts die Räume etwas hatte abkühlen lassen, pflegt man sie morgens hochzuheizen, auch werden sie wohl morgens eine Zeitlang durch Fensteröffnen gelüftet; Bäder werden auch überwiegend vormittags genommen, vormittags ist auch der Hauptbetrieb in der Küche. Über die Jahreszeit verteilt, pflegt der größte Bedarf an Heizwärme nicht vor Weihnachten zu fallen, wie der größte Lichtbedarf, sondern erheblich nach Weihnachten: Januar und Februar sind die kältesten Monate.

Dampfhergabe der Maschine und Dampfverbrauch der Heizung verlaufen also zeitlich in verschiedener Weise und entsprechen einander nicht immer. Daher wird zu manchen Zeiten die Dampfmaschine weniger Dampf liefern, als die Heizung verbraucht, man muß dann noch Dampf zusetzen, während zu anderen Zeiten die Heizung nicht allen von der Maschine gelieferten Dampf verbrauchen kann. Diesen Umständen gerecht zu werden, ist der Zweck der Einrichtungen, die auch noch in Abbildung 56 zu erkennen sind. Man fügt in Leitung 5 ein selbsttätiges Frischdampf-Zusatzventil ein und in Leitung 6 ein selbsttätiges ins Freie abblasendes Sicherheitsventil. Kann die Heizung den von der Maschine abgegebenen Dampf zeitweise nicht verbrauchen, so wird sich der Dampf hinter der Maschine stauen, der Dampfdruck steigt, öffnet das Sicherheitsventil und dabei sich selbst den Weg ins Freie: ein gewisser Teil des Dampfes bläst ab, wobei dann allerdings dessen Wärme verloren geht. Wenn dagegen umgekehrt die Maschine weniger Dampf liefert, als die Heizung eigentlich verbrauchen möchte, so wird infolge von Dampfmangel der Druck hinter der Maschine sinken — nicht stark freilich, denn unter den Atmosphärendruck kann er nicht herabgehen, aber immerhin so weit, daß sich das Sicherheitsventil von selbst unter der Einwirkung eines Gegengewichts schließt, und wenn das noch nicht genügt und der Druck noch weiter abfällt, so öffnet sich unter dem Einfluß des zu geringen Druckes selbsttätig das Frischdampf-Zusatzventil, das so wie ein Druckminderventil gebaut ist. Diese beiden Ventile also, die übrigens gelegentlich auch mit der Hand betätigt werden, statt selbsttätig zu wirken, halten den Druck hinter der Maschine in engen Grenzen schwankend auf einer vorgeschriebenen Höhe.

Nicht immer leitet man den Abdampf selbst in die zu heizenden Räume. Man läßt ihn seine Wärme auf Wasser übertragen, etwa auf das Wasser der allgemein bekannten Warmwasserversorgungsanlagen, mit denen man Wohnhäuser und Krankenhäuser versieht. Die Anordnung wird dann etwas komplizierter, wie Abbildung 57 es zeigt. Wir haben wieder den Kessel, die Dampfmaschine, den Ölabscheider und die beiden Regelventile. Der Dampf aber geht diesmal in einen Wasserwärmer, in dem er in ein Rohrbündel tritt, das anderseits von dem zu erwärmenden Wasser umspült wird, so daß er seine Wärme an dieses abgibt, sich selbst zu Wasser niederschlagend. Das aus dem Dampf sich bildende Kondensat bleibt von dem erwärmten Wasser getrennt, läuft durch Leitung 3 zum Kondenswasserbehälter zurück und wird von neuem in den Kessel gespeist, um seinen Kreislauf wieder zu beginnen. Das zu erwärmende Nutzwasser wird in gleichmäßigem Strom durch den Wasserwärmer



Abbild. 57. Dampfkraftanlage mit Ausnutzung des Abdampfes zur Bereitung von warmem Wasser.

gedrückt mittels einer Umlaufpumpe, die es in einem Rohrnetz zirkulieren läßt, an dem sich die Zapfhähne befinden. Wollte man das Wasser nur unter dem Einfluß des Druckes der städtischen Leitung dem Wasserwärmer und den Zapfstellen zuführen, so würde es in den Rohrstängen stagnieren, sobald keine Zapfstelle offen ist, es würde sich abkühlen, und man müßte lange warten, bis man nach Öffnen eines Hahns warmes Wasser erhält. Dem hilft die Umlaufpumpe ab, die für dauernden Umlauf des Wassers sorgt, so daß sich auch an den entferntesten Stellen der Rohrleitung warmes Wasser befindet und beim Zapfen gleich warmes Wasser läuft.

Übrigens ist es nicht nötig, den Dampf bis auf Atmosphärenspannung herunter auszunutzen. Gelegentlich läßt man ihn nur, sagen wir von 12 bis auf 3 Atm. expandieren, und dann verwendet man den noch mit 3 Atm. gespannten Dampf als Abdampf zu irgendwelchen Heizzwecken. Das geschieht in der chemischen Industrie vielfach, wenn man in den zu beheizenden Kochgefäßen mehr als 100° Temperatur braucht: die Temperatur des Dampfes ist ja von seinem Druck abhängig. Natürlich zieht man dann weniger Arbeit aus dem Dampf, braucht also mehr Dampf zur Erzielung einer bestimmten Leistung; aber das ist belanglos, wenn das Kochen so große Wärmemengen erfordert, daß man ohnehin noch Dampf zusetzen muß.

In allen Fällen, wo man die einfache Auspuffmaschine in solcher Weise mit Abdampfausnutzung betreiben kann, ist sie gut am Platze und zeichnet sich durch billige Beschaffungskosten und einfache Bauart aus. —

Wir wollen nun zusehen, in welcher Weise man den Dampfverbrauch der Maschine herunterdrücken kann, in welcher Weise man also den in Arbeit umgesetzten Teil der Wärme vergrößern kann in solchen Fällen, wo nicht eine Ausnutzung der unbenutzt gebliebenen Wärme möglich ist.

Die Ausnutzbarkeit der Wärme zur Arbeitserzeugung läßt sich erhöhen, indem man die Anfangstemperatur des Dampfes erhöht, denn dadurch werden die Temperaturgrenzen erweitert, innerhalb deren die Wärme nutzbar ist, und das verbessert, wie wir wissen (S. 65), den erreichbaren thermischen Wirkungsgrad. Es wird sich also eine Verminderung des Dampfverbrauchs der Maschine dann ergeben, wenn man den Druck steigert, mit dem der Dampf den Kessel verläßt und mit dem er zur Maschine kommt.

Es ist in der Tat einzusehen, daß durch S t e i g e r u n g d e s D a m p f d r u c k e s eine größere Arbeitsausbeute erreicht wird. Abbildung 58 läßt erkennen, daß noch die

den Dom entnommen; am Dom sitzt das bekannte Sicherheitsventil, das zu hohe Drucke und daher Unglücksfälle verhüten soll. Man hat sich nun mehrere solcher Kessel nebeneinanderliegend zu denken, die alle ihren Dampf in die große, quer über sie hinweggehende Hauptdampfleitung geben, und zwar kann jeder der Kessel das entweder direkt tun — dazu verbindet eine (absperrbare) Rohrleitung (die linke hochgehende) den Dom mit der Hauptdampfleitung. Ist diese Leitung offen, so liefert der Kessel Sattdampf von der Siedetemperatur des Wassers im Kessel. Diese direkte Verbindungsleitung kann aber auch abgesperrt werden, wenn der Dampf durch den Überhitzer gehen soll — den rechts zu erkennenden Aufbau des Kessels, zu dem eine Leitung vom Dom aus hinführt —, während eine zweite vom Überhitzer aus zur Hauptdampfleitung geht. Sind diese Leitungen offen, statt der direkten, so muß der Dampf durch das Schlangenrohrbündel des Überhitzers gehen; das wird aber von den Feuergasen umspült, die durch Mauerwerk so geleitet werden, daß sie vom Flammrohr erst aufwärts zum Überhitzer und dann erst wieder abwärts in den Seitenzug gehen. Der Dampf nimmt im Überhitzer noch Wärme auf, und da dort kein Wasser zum Verdampfen vorhanden ist, so steigt die Temperatur — der Druck kann sich natürlich nicht steigern, da der Dampfdruck im Kessel festliegt.

Hinsichtlich der Einzelheiten des Kessels sei nur darauf aufmerksam gemacht, wie alle Mauerungen mit Luftschicht versehen sind, zwecks besserer Isolation, und wie die Rohrleitungen im Bogen geführt sind, um sie für Wärmedehnungen nachgiebiger zu machen. Auch die Ausführung der Flammrohre als „Wellrohre" hat den Zweck, ihnen Nachgiebigkeit bei ungleicher Wärmedehnung zu geben.

Mit der Einführung der Überhitzung ist, auf das Kilogramm Dampf bezogen, ein erhöhter Kohlenaufwand verbunden, und wenn auch eine mit überhitztem Dampf arbeitende Maschine, auf die Nutzarbeit bezogen, weniger Dampf verbraucht, so ist immerhin nicht ohne weiteres zu sehen, ob dadurch so viel mehr Arbeit erhalten wird, daß man mit Sicherheit auf eine größere Arbeitsausbeute aus dem Kilogramm Kohle, d. h. also auf einen besseren Wirkungsgrad der g e s a m t e n Dampfanlage rechnen kann. Daß mit der Überhitzung wirklich Ersparnisse zu erzielen sind, läßt sich nicht wohl anschaulich erklären, es sei denn etwa, man wollte es ganz allgemein folgern aus der Tatsache, daß die Temperaturgrenzen erweitert werden, innerhalb deren die Wärme ausgenutzt wird.

Jedenfalls lehrt aber die Erfahrung, daß mit der Verwendung überhitzten Dampfes nicht nur eine Ersparnis an Dampf verbunden ist, was ja nicht erstaunlich wäre, da es sich um wertvolleren Dampf handelt, sondern daß auch eine Kohlenersparnis in erheblichem Maße damit verbunden ist. Man geht mit dem Überhitzen meist auf etwa 250 bis 300° C; da für die gebräuchlichsten Dampfdrucke von 10 bis 12 Atm. die Verdampfungstemperatur des Wasserdampfes etwa 180° beträgt, so überhitzt man also den Dampf meist um etwa 70 bis 120° C und erweitert daher die Temperaturgrenzen auf fast das Doppelte dessen, was bei Sattdampf verfügbar ist. Mit dieser Maßnahme sind denn Kohlenersparnisse im Betrage von 10 bis 20% verbunden. Man ist mit der Überhitzung sogar bis auf 350 und 400° C heraufgegangen, unter Erreichung noch weiterer Erparnisse.

Aber im allgemeinen begnügt man sich mit mäßigen Überhitzungen, und zwar deshalb, weil bei zunehmender Überhitzung die den hohen Temperaturen einerseits der Feuergase, anderseits des Dampfes ausgesetzten Teile schnellerem Verderben ausgesetzt sind. Ohnehin ist die richtige Konstruktion der für den Betrieb mit überhitztem Dampf bestimmten Dampfkessel, Rohrleitungen und Maschinen keine einfache

Aufgabe und ist erst im Laufe der Jahre nach manchen schweren Erfahrungen befriedigend gelungen. Außer der Tatsache, daß an sich nicht jedes Material den Wirkungen überhitzten Dampfes gut widersteht (so werden Bronze und die meisten anderen Kupferlegierungen von überhitztem Dampf stark angegriffen und müssen ganz vermieden werden), machen sich insbesondere Schwierigkeiten geltend durch die mit den großen Temperaturänderungen verbundenen Längenänderungen; auch waren nicht leicht für die im überhitzten Dampf bewegten Maschinenteile, wie die Kolben, brauchbare Schmiermittel zu finden.

Die Wärmedehnungen machen sich bereits an jeder Dampfmaschine bemerkbar; sie werden natürlich mit zunehmender Temperatur immer stärker. Sie führen zu Verbiegungen des Materials, Teile, die starr miteinander verbunden sind, verspannen sich gegeneinander und verbiegen sich. Das führt einesteils dazu, daß die Kolben der Kolbenmaschine, die Laufräder der Dampfturbinen nicht mehr so in ihren Führungen laufen, wie sie kalt eingepaßt sind, sondern daß sie sich unter Umständen festklemmen. Anderseits können auch durch die verschiedene Dehnung mehrerer gegeneinander verspannter Teile diese direkt zum Bruch geführt werden, so wie ja auch Glas beim Erwärmen springt, nicht weil es die Temperatur an sich nicht aushalten kann — jede Glasbläserei lehrt das Gegenteil —, sondern deshalb, weil es sich wegen der schlechten Leitfähigkeit des Glases für Wärme auf der erwärmten Seite so viel schneller als auf der anderen erwärmt, daß die Dehnungen zum Springen des an sich nicht sehr dehnbaren Materials führen. Daher widersteht Glas den Einflüssen von Wärme um so besser, je dünner es ist: die chemischen Kochgläser werden mit einer geringen Wandstärke ausgeführt. Nun ist freilich Eisen erheblich dehnbarer als Glas, ist auch ein besserer Wärmeleiter als jenes, und so wird es unter dem Einfluß der Wärmedehnungen allein weniger leicht springen. Aber die durch die Wärmedehnungen entstehenden Spannungen kommen zu denen hinzu, die in den Maschinenteilen ohnehin auftreten wegen des Dampfdrucks und der Wucht der bewegten Massen. Da können die Einflüsse zusammen zu einem Bruch führen, wo die einzelne Ursache ihn noch nicht erwarten ließ: es kommt jedenfalls durch die Rücksichtnahme auf hohe Temperaturen eine weitere Schwierigkeit in die Konstruktion.

Die Beherrschung der infolge der Wärmeausdehnung eintretenden Verhältnisse erfordert viel Erfahrung, die man in dem Maße, wie es für hoch überhitzten Dampf nötig ist, erst in den letzten Jahren hinreichend gesammelt hat. Insbesondere die Rohrleitungen machten und machen auch noch manche Schwierigkeit. Längere Rohrleitungen erfahren entsprechend große Ausdehnungen, und wenn für freie Beweglichkeit nicht hinreichend gesorgt ist, so muß unweigerlich etwas brechen. Bewegliche Aufhängung und Anwendung beweglicher Verbindungsstücke zwischen den einzelnen Leitungen sind die Maßnahmen, die hier zum Ziele führen. Abbildung 60 zeigt den Blick auf eine größere Rohranlage, bei der insbesondere durch Anordnung von nachgiebigen gekrümmten Rohrstücken für die freie Beweglichkeit Sorge getragen ist.

Außer der Temperaturdehnung machte, wie erwähnt, die Beschaffung brauchbarer Schmiermittel bei den hohen Temperaturen, auf die der Dampf überhitzt wird, Schwierigkeiten. Die gewöhnlichen Schmieröle verdampfen oder zersetzen sich, büßen jedenfalls ihre Schmierfähigkeit ein. Erst in dem Maße, wie man durch Verbesserung der Mineralöle ein für überhitzten Dampf geeignetes Öl geschaffen hat, ist es möglich geworden, die höheren Überhitzungstemperaturen praktisch nutzbar zu machen.

Dinge wie die Wärmeausdehnung der Maschinenteile und die Schmierung der Maschinen erscheinen dem Laien als Äußerlichkeiten ohne Belang. Gerade deshalb

wollten wir darauf hinweisen, wie durch scheinbar nebensächliche Kleinigkeiten der technische Fortschritt jahre- und jahrzehntelang aufgehalten werden kann, und daß erst durch die betriebssichere Ausbildung zahlloser Einzelheiten der große Fortschritt praktisch möglich wurde, der in der Anwendung der Überhitzung liegt und den man als solchen schon längst erkannt und erstrebt hatte.

Ein weiteres Mittel zur Verminderung des Dampfverbrauchs ist die Kondensation des Dampfes, deren Ausbildung eine der bewunderungswürdigsten Taten von James Watt ist.

Die Kondensations-Dampfmaschine läßt den Dampf unter die Atmosphärenspannung herunter expandieren. Das wäre an sich ohne weiteres möglich, wie wir an dem Beispiel von Luft bei Abbildung 28 gesehen haben; aber es wäre kein Vorteil, sogar ein Nachteil damit verbunden, wenn wir den Dampf nachher wieder in die Atmosphäre hinausgehen lassen müßten. Das ist aber nicht nötig, weil wir, sofern Kühlwasser zur Hand ist, den Dampf in jenem niedriggespannten Zustande durch Wärmeabführung kondensieren, in Wasser verwandeln können, worauf er beim Rückgang keinen Gegendruck mehr auf den Kolben der Maschine ausüben kann.

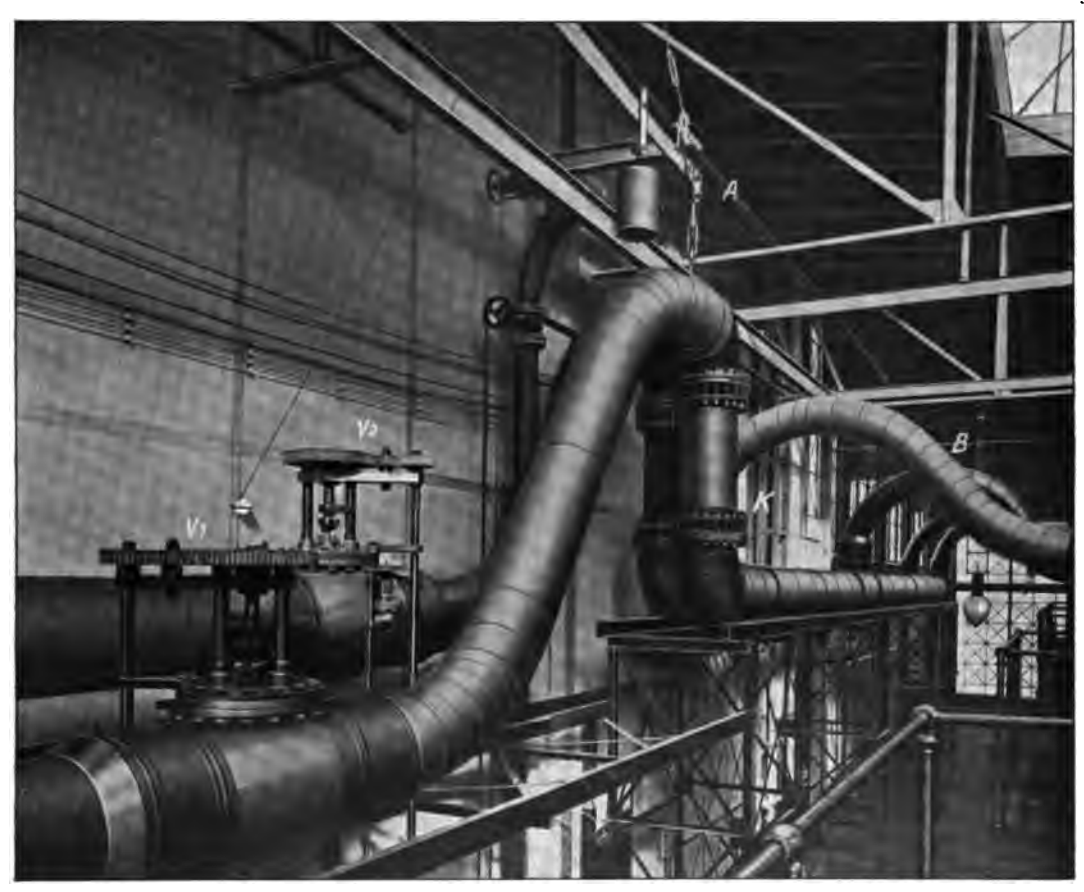


Abbildung 60. Blick auf die Rohrleitungen in einem Kesselhaus. A = Nachgiebige Aufhängung mit Gegengewicht. B = Bögen zum Aufnehmen der Wärmedehnungen. K = Kompensationsstück mit Kugelgelenkdichtungen zum Ausgleichen großer Wärmedehnungen. V_1 V_2 = Ventile, von unten her zu bedienen. — Gesellschaft für Hochdruck-Rohrleitungen, Berlin.

Es tritt also zu den uns bekannten Teilen der Dampfmaschine ein Kondensator — bei größeren Maschinen oder Maschinengruppen eine entsprechend große Kondensationsanlage — hinzu, dessen Aufgabe es ist, den Gegendruck der Atmosphäre für die Maschine zu beseitigen. Die Wirkungsweise einer Kondensationsanlage läßt sich an Abbildung 61 erläutern. Die Dampfmaschine — Kolbenmaschine oder Turbine — entläßt ihren Dampf nicht wie bisher ins Freie, sondern schickt ihn in den Kondensator, einen zylindrischen Behälter, der von einem Bündel Messingrohre durchsetzt ist; durch die Rohre hindurch fließt Kühlwasser, das durch eine Kühlwasserpumpe — es ist eine Zentrifugalpumpe gezeichnet — aus dem Brunnen angesogen, und das durch den Verteilungskopf auf das Rohrbündel verteilt, durch den Sammelkopf gesammelt und abgeführt wird. Im Kondensator wird dem Dampf Wärme entzogen, und er verdichtet sich zu Wasser. Damit der Atmosphärendruck für die Maschine be-

Abbildung 61. Schema einer Kondensationsanlage mit Rückkühlung des Kühlwassers und Rückführung des noch warmen Kondensates ins Kesselhaus zum Speisen der Dampfkessel.

seitigt wird, damit also Vakuum im Innern des Kondensators entsteht, ist es indessen noch nötig, auch die Luft aus dem Kondensator zu beseitigen. Das geschieht durch eine Luftpumpe, die die Luft aus dem Innern des Kondensators absaugt, sie komprimiert und in die Atmosphäre hinausstößt, ganz ebenso wirkend, wie die bekannte physikalische Luftpumpe es tut. Diese Luftpumpe muß dauernd laufen: bei Inbetriebsetzung der Maschine und der Kondensation, um den Kondensatorraum zunächst einmal luftleer zu pumpen, weiterhin aber, um dauernd die Luft zu beseitigen, die unvermeidlich durch Undichtheiten des Kondensators und des bei großen Maschinenanlagen oft weitverzweigten Abdampfrohrnetzes eindringt, und die das einmal vorhandene Vakuum zerstören würde.

Wir brauchen also zum Aufrechterhalten des Vakuums im Auspuff der Hauptmaschine drei Hilfsmaschinen, nämlich erstens die Kühlwasserpumpe, zweitens die Luftpumpe, die die Luft aus dem Innern des Kondensators entfernt, und nun drittens noch eine Kondenswasserpumpe, die das aus dem kondensierten Dampf entstandene Kondenswasser aus dem Innern des Kondensators fortnimmt und in die Atmosphäre drückt. Denn letzteres läuft nicht freiwillig aus dem Kondensator, in dem Vakuum herrscht, in die Atmosphäre. Die letzte Pumpe ist also nötig, weil sich sonst das Kondenswasser im Kondensator mehr und mehr anstauen würde, bis es schließlich in den Maschinenzylinder zurückträte.

Solche Kondensationsanlagen dienen übrigens nicht nur im Maschinenbetrieb zum Niederschlagen des Abdampfes und zum Erzeugen des Vakuums — in viel größerem Maßstabe braucht sie die chemische Industrie zur Beseitigung der großen, aus Kochprozessen herrührenden Dampfmengen, wobei der Kochprozeß meist dem Eindampfen von Lösungen, etwa von Zuckerlösung, dient; Vakuum aber wendet man gern an, weil das Sieden dann unter niederer Temperatur erfolgt, also einesteils weniger Wärme nötig ist, anderseits die bei höherer Temperatur gelegentlich eintretenden Zersetzungen vermieden werden.

Bei jeder Kondensationsanlage kann man im Prinzip die drei Funktionen beob-

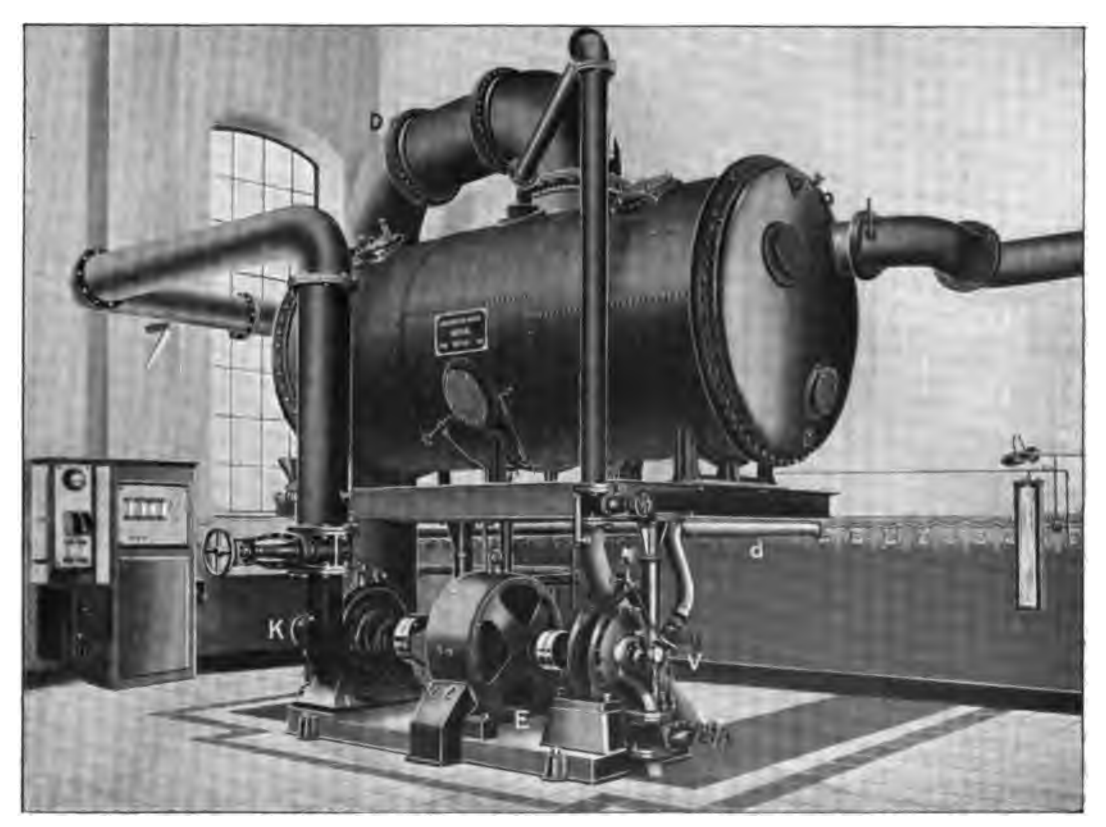


Abbildung 62. Kondensator mit zugehörigen Pumpen; die Pumpen sind rotierend. E = Elektromotor zum Antrieb. K = Kühlwasserpumpe. D = Abdampfrohr. V = Luftpumpe nach Leblanc. d = Dampfzuführung zum Abdichten der Stopfbüchse von V gegen eindringende Luft. Maschinenbau-Anstalt Breslau und Maschinenbau-Gesellschaft Balcke, Bochum.

achten, die in Abbildung 61 den drei Pumpen übertragen sind. Je nach Umständen kann man freilich auch mit zwei oder nur einer Pumpe auskommen, die dann Luft sowohl als auch Kondens- und Kühlwasser, alles zusammen, fördert — man verwendet eine nasse Luftpumpe statt einer trockenen. Auch wird die Entfernung des Kondensats wohl einem barometrischen Abfallrohr überlassen, wenn der Kondensator hoch genug steht. Auf diese Abänderungen können wir hier nicht eingehen.

Aber folgendes sei noch erwähnt. Zum Kondensieren des Dampfes ist die latente Wärme ins Kühlwasser überzuführen; das erwärmt sich dabei. Diese Wärme macht den größeren Teil der im Kessel erzeugten aus, da nur ein kleiner Bruchteil in Arbeit verwandelt werden konnte. Die Wärme muß irgendwo bleiben. Hat man Kühlwasser in genügender Menge zur Verfügung, so ist es das einfachste, das warme Wasser fortlaufen zu lassen und neues, kaltes dafür einzunehmen; das geschieht stets auf Schiffen. Wo man aber im Binnenland kein Wasser hat, da macht es Not, die Wärme loszuwerden. Man verwendet dann eine Rückkühlung: das Wasser wird auf einen Kühlturm gedrückt und fällt dort herab; durch den Turm streicht Luft, und durch Wärmeabgabe an die Luft, teils auch durch Verdunstung kühlt sich das Wasser so weit ab, daß es von neuem als Kühlwasser verwendet werden kann. Es vollführt dauernd einen Kreislauf, nur das verdunstete wird ersetzt, und das eigentliche Kühlmittel ist nun die Luft — im Sommer hilft die Verdunstung. Abbild. 61 zeigt auch den Kühlturm im Schnitt, Abbildung 63 einen solchen in Ansicht. Es gibt hölzerne und eiserne Kühltürme.



Abbild. 63. Eiserner Kühlturm einer Rückkühlanlage. Maschinenbau-Gesellschaft Balcke, Bochum.

Da die drei zur Kondensation erforderlichen Pumpen ihrerseits Arbeit verbrauchen, so ist es nicht von vornherein sicher, daß man durch die Anwendung des Kondensationsbetriebes einen Arbeitsgewinn behält. Tatsächlich ist das der Fall, und zwar in erheblichem Maße. Man könnte fragen, woher denn ein Gewinn kommt, da man den Dampf, der im Zylinder bis unter Atmosphärenspannung herunter expandiert war, doch nachher durch die Kondenswasserpumpe wieder in die Atmosphäre hinausdrücken muß. Es ist aber zu bedenken, daß ja aus dem großen Dampfvolumen, das im Zylinder Arbeit geleistet hat, nur ein kleines Wasservolumen entsteht, das nachher wieder herauszuschaffen ist.

Wir können uns die Vorteile der Kondensation am Druck-Volumen-Diagramm klarmachen. Wenn wir in Abbildung 64 eine gewisse Dampfmenge, entsprechend der

Strecke BC, in den Zylinder eingeführt haben, die dann expandiert, so erhalten wir, zunächst bis zur Atmosphärenlinie herunter, die rechtsschraffierte Fläche I. Wenn wir den Dampf noch weiter expandieren lassen, bis zum Punkte D, so würden wir keinen Arbeitsgewinn haben, wenn wir nachher das Dampfvolumen in die Atmosphäre ausblasen lassen müßten. Es würde sich dann vom Punkte D aus der Druck durch Zurücktreten von Luft in den Arbeitszylinder bis X steigern, und die Fläche D_1DX würde, weil sie im umgekehrten Sinne (Pfeil 1) umfahren ist wie A_1BCD_1, nicht einen Arbeitsgewinn, sondern sogar einen Arbeitsverlust darstellen: es entstände eine Verlustschleife im Indikatordiagramm.

Nun kommt uns aber die Eigenschaft des Wasserdampfes zu Hilfe, daß wir durch Wärmeentziehung ihn kondensieren, d. h. sein Volumen fast ganz beseitigen können. Im Punkte D wird daher das Volumen ED plötzlich verschwinden, und daher wird unter dem Einflusse des Vakuums der Arbeitskolben zurückgesogen. So wird noch die mit II bezeichnete, links- und kreuzschraffierte Arbeitsfläche A_1D_1DE in Freiheit gesetzt, die ja in demselben Sinne umfahren ist wie die Fläche I (Pfeil 2).

Der Arbeitsgewinn ist also der Eigenschaft des Wasserdampfes zu verdanken, sich kondensieren zu können. Das ist die mechanische Erklärung des Vorganges. Thermisch ist die Möglichkeit des Arbeitsgewinns begründet darin, daß der Dampf jetzt bis zu tieferen Drucken und daher — wegen der Spannungskurve Abbildung 54 — tieferen Temperaturen expandiert, und daß die ihm ursprünglich innewohnende Wärme innerhalb weiterer Temperaturgrenzen ausgenutzt wird.

Man darf auch nicht etwa meinen, daß bei der Kondensation nur kleine Arbeitsmengen zu gewinnen sind. Zwar nutzt man oberhalb der Atmosphäre die Druckstufe von 5 Atm. bis 1 Atm. absolut aus, also einen Druckunterschied von 4 Atm., und die Kondensation kann nur noch eine einzige weitere Atmosphäre, bestenfalls bis herab zum absoluten Vakuum — in Wahrheit natürlich nicht so weit —, nutzbar machen. Aber der Arbeitsgewinn ist nicht durch die Druckunterschiede gegeben. Wir sehen an Abbildung 64, daß außer dem Druckunterschied für die Größe der erhaltenen Fläche auch noch das Volumen maßgebend ist, und daß gerade in den unteren Druckstufen ein viel größeres Volumen arbeitet als in den oberen. Daher ist für die Größe der zu erhaltenden Fläche nicht der Unterschied, sondern das Verhältnis der Drucke maßgebend. Wenn also oberhalb der Atmosphäre die Expansion von 5 Atm. absolut auf 1 Atm. absolut, im Verhältnis wie 5 zu 1 stattfindet, unterhalb der Atmosphäre von 1 Atm. absolut auf 0,2 Atm. absolut (80 % Vakuum), also wieder im Verhältnis wie 5 zu 1, so werden die beiden Flächen I und II einander gleich sein. Es ist also nicht ausgeschlossen, daß sich durch die Wirkung der Kondensation die Arbeitsausbeute verdoppelt.

In der Tat ist das, was durch die Kondensation zu gewinnen ist, recht erheblich; doch ist der Gewinn verschieden bei Kolbenmaschinen einerseits, bei den rein umlaufenden Turbinen anderseits. Auch diese Erfahrungstatsache kann man sich an Hand von Abbildung 64 klarmachen. Man kommt auf sehr große Dampfvolumina, wenn man die Ausnutzung des Vakuums bis zu den tiefsten (absoluten) Drucken heruntertreiben will. Bei der Kolbenmaschine muß man nun dem Zylinder eine solche Größe geben, wie sie der Länge ED entspricht. Der Zylinder würde fünfmal so groß werden wie bei einer Auspuffmaschine, bei der man nur Dampfvolumina bis zur Größe der Strecke A_1D_1 zu bewältigen hätte. Der Zylinder würde so unförmlich, daß man das lieber vermeidet; man begnügt sich mit der Zylindergröße EH, verliert dann aber freilich die gekreuzt schraffierte Fläche GDH, weil beim Öffnen

des Auslaßkanals der Druck plötzlich, ohne Arbeitsleistung, von G bis H sinkt. Diesen Verlust nimmt man bei Kolbenmaschinen in Kauf, um allzu große Zylinder zu vermeiden; diese würden teuer und schwerfällig, auch wäre man gar nicht sicher, den der Fläche GDH entsprechenden Gewinn wirklich zu haben, da ja ein allzu großer und schwerer und große Wege machender Kolben größere Arbeitsverluste verursacht, die dann leicht mehr ausmachen als der Arbeitsgewinn. Und diese Verhältnisse werden mit noch besserem

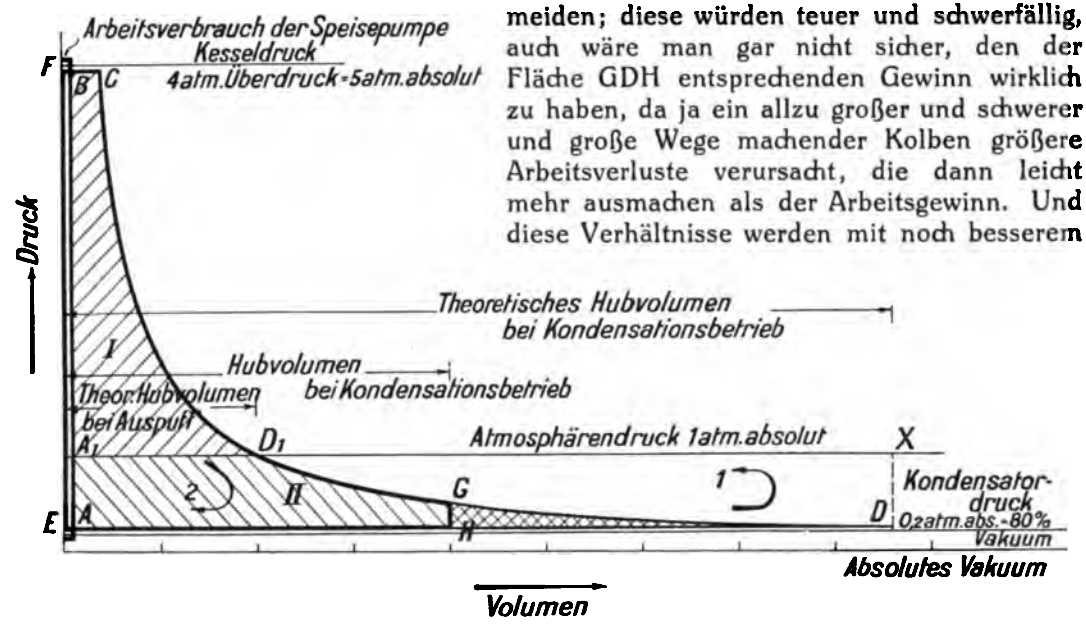


Abbildung 64. Diagramm zur Veranschaulichung der durch Einführung des Kondensationsbetriebes erzielbaren Vergrößerung der Arbeitsausbeute.

Vakuum rasch schlimmer: das Vakuum kommt im Wechselspiel der Steuerung gar nicht mehr in den Zylinder hinein.

Viel günstiger liegen die Verhältnisse bei den Dampfturbinen, bei denen man eher damit zu kämpfen hat, daß in den oberen Druckstufen, wo die Volumina des Dampfes sehr klein sind, die Schaufeln allzu winzig werden. Gerade in den unteren Stufen kommt man auf bequeme Abmessungen.

Daher wird der Dampfverbrauch der Dampfturbine viel mehr dadurch beeinflußt, wenn das von der Kondensation erzeugte Vakuum ein sehr gutes ist, als der der Kolbendampfmaschine, die das Vakuum doch nicht so gut ausnutzen kann, wie es ihr vom Kondensator zur Verfügung gestellt wird. So hat sich erst seit der Entwicklung der Dampfturbinen auch die Theorie und die Technik des Baues der Kondensationsanlagen verfeinert. Es ist heute möglich, sehr gutes Vakuum für die Dampfturbinen zu erzielen, den absoluten Druck bis auf 0,05 Atm. herunterzuziehen, d. h. also 95 % des Atmosphärendrucks zu beseitigen und die großen dabei auftretenden Dampfvolumina für den Betrieb nutzbar zu machen.

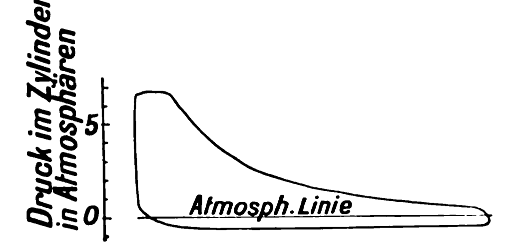


Abbildung 65. Indikatordiagramm einer mit Kondensation arbeitenden Dampfmaschine. Das Diagramm geht unter die atmosphärische Linie herab (vergleiche dagegen Abbild. 33).

Abbildung 65 zeigt das mit dem Indikator aufgenommene Diagramm einer mit Kondensation arbeitenden Dampfmaschine; am Ende der Expansionslinie sieht man den großen Spannungsabfall, den man zur Verminderung der Zylinderräume in den Kauf nimmt.

In Abbildung 66 gibt das Sankey-Diagramm Auskunft über den Wärmeverbleib der Kondensationsmaschine. Ein Vergleich mit Abbildung 55 zeigt, daß jetzt nicht mehr 10 %, wie bei der Auspuffmaschine, sondern 15 % der im Dampf steckenden Wärme in Arbeit umgesetzt werden; die Arbeitsausbeute ist also 50 % größer geworden. Dafür gehen nun nicht mehr 80 % in den Abdampf, sondern nur 65 % in das Kühlwasser der Kondensation, dessen Temperatur dadurch auf etwa 40 ° C zu kommen pflegt, und gegen 10 % bleiben in dem aus dem Dampf gebildeten Kondensat, das den Kondensator mit etwa 60 ° C verläßt. Man kann den maschinellen Betrieb noch etwas verbessern, indem man das aus dem Dampf gebildete warme Kondensat als Speisewasser für den Kessel verwendet: das geschieht stets auf Seeschiffen, weil man Seewasser, des Salzgehalts wegen, nicht zum Kesselspeisen verwenden kann; es geschieht aber auch in Betrieben an Land, um Kesselstein zu vermeiden und um die Kondensatwärme noch nutzbar zu machen, die sich allerdings, bis das Wasser in den Kessel zurückkommt, durch Wärmeverluste verringert hat. Immerhin ist angenommen, daß man durch die Rückleitung des Kondensats gegen 5 % Kohlen erspart. Auch der Vorteil der Rückleitung läßt sich im Sankey-Diagramm gut erkennen.

Wo man auf die Rückleitung im Interesse einfacheren Betriebes verzichtet, da kann man auch statt der Oberflächenkondensation (Abbildung 61 u. 62) eine „Mischkondensation" verwenden: Kondensat und Kühlwasser bleiben nicht durch die Kondensatorwände voneinander getrennt, sondern der Dampf wird durch direkte Berührung mit dem Kühlwasser kondensiert, und sein Kondensat mischt sich mit dem Kühlwasser. Nun enthält das Gemisch von Kühlwasser und Kondensat die ganzen 65 + 10 = 75 % Wärme, die mit etwa 40 ° C abgehen. Abbildung 67 zeigt für diesen einfacheren Fall das Sankey-Diagramm. —

Ein Mittel, um den Dampfverbrauch von Kolbenmaschinen herabzudrücken, ihren Gütegrad also zu erhöhen, ist die Anwendung der Verbundwirkung. Man läßt dabei den Dampf nicht in einem einzigen Zylinder ganz expandieren, sondern verteilt das Druckgefälle auf mehrere Zylinder. Bei Schiffsmaschinen geht man bis zu vier-

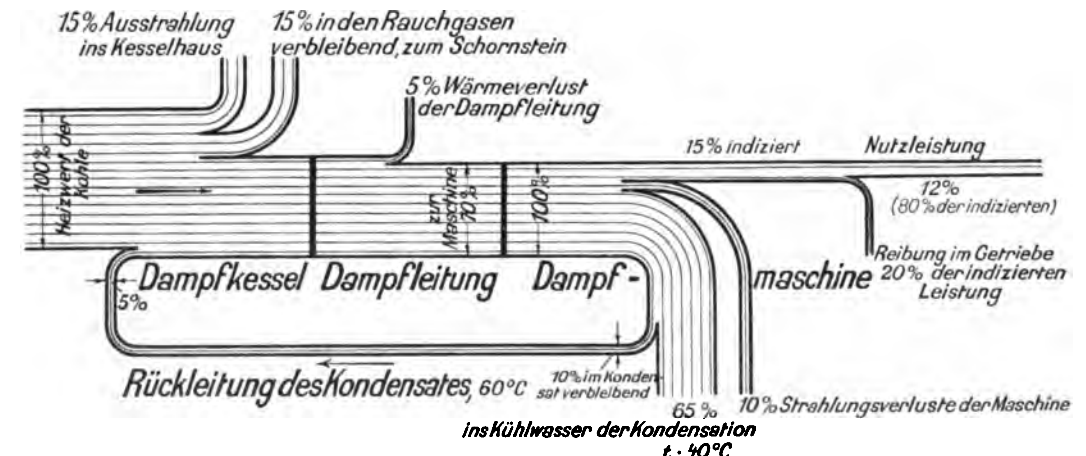
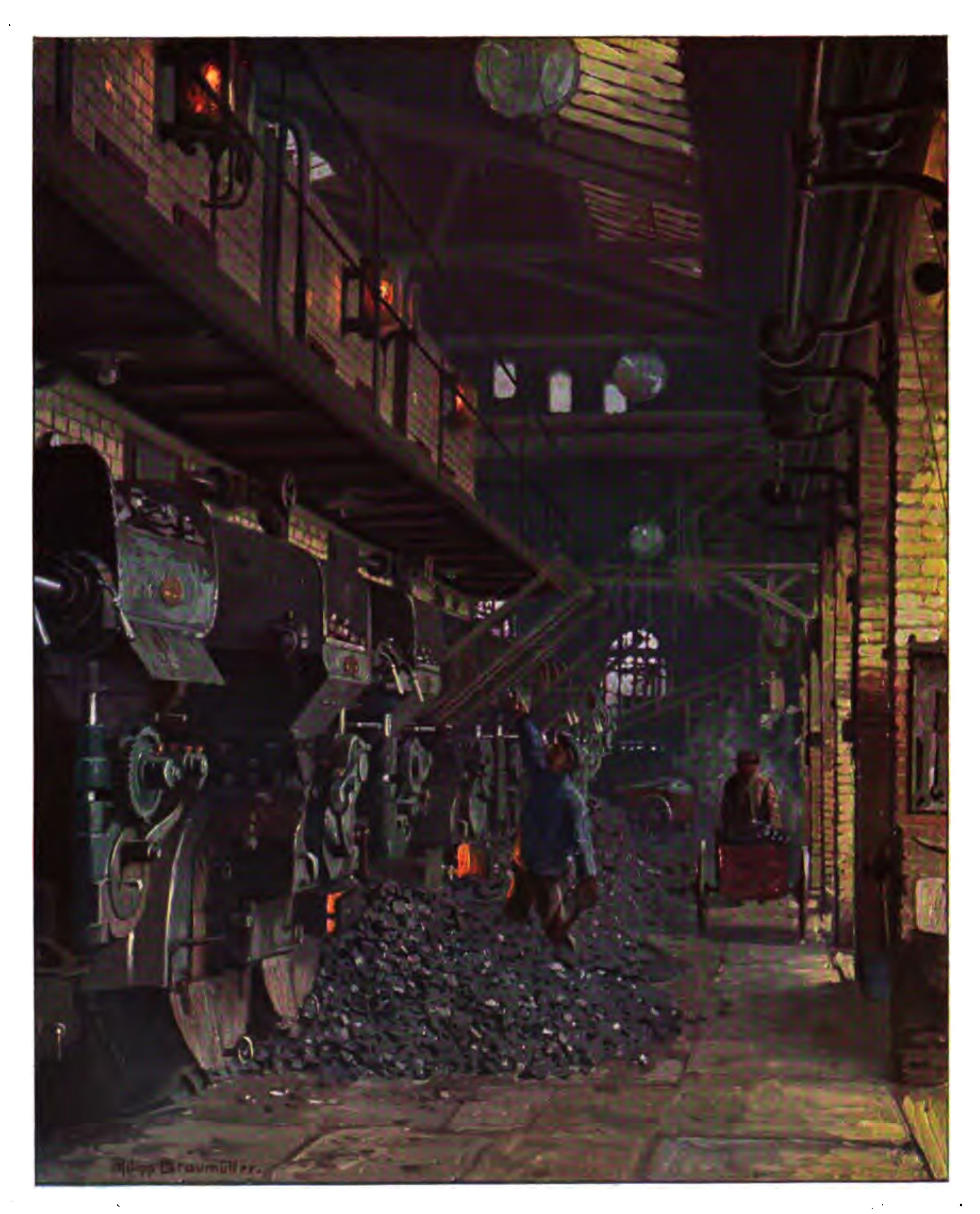


Abbildung 66. Sankey-Diagramm zum Nachweis des Wärmeverbleibs für eine mit Kondensation und mit Rückleitung des Kondensats zum Kessel arbeitende Dampfkraftanlage.

facher Expansion, d. h. bis zur Verteilung des Druckgefälles auf vier Zylinder, die der Dampf hintereinander durchläuft. Bei Schiffen kommt es nämlich besonders auf geringen Dampfverbrauch an, weil bei ihnen ein übermäßiger Kohlenverbrauch nicht nur



Automatische Kesselfeuerung.

Zu Gramberg: Die Umsetzung und Verwertung der Energie in Maschinen.

durch erhöhte Kohlenkosten ins Gewicht fällt, sondern weil der Kohlenvorrat überdies als tote Last mitgeschleppt werden muß, so daß sich dadurch das nutzbare Ladegewicht des Schiffes vermindert. Bei Kriegsschiffen kann man zwar von einem nutz-

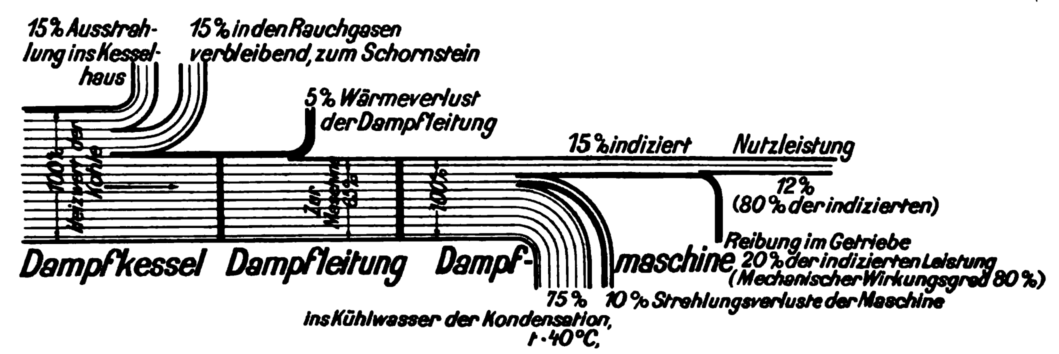


Abbildung 67. Sankey-Diagramm für eine mit Mischkondensation und daher ohne Rückleitung des Kondensats arbeitende Dampfkraftanlage. Man vergleiche Abbildung 55.

baren Ladegewicht nicht sprechen, aber auch bei ihnen ist man, ja sogar noch in erhöhtem Maße, auf Verminderung des Kohlenverbrauchs bedacht, weil es bei ihnen wichtig ist, mit dem in den Bunkern unterzubringenden Kohlenvorrat möglichst große Strecken ohne Erneuerung der Kohlen zurücklegen zu können: es ist wünschenswert, den Schiffen einen großen Aktionsradius zu verleihen, insbesondere bei den Staaten, die nicht wie England den ganzen Erdball mit Kohlenstationen überzogen haben. Man wird sich erinnern, mit welchen Schwierigkeiten 1904 die russische Flotte zu kämpfen hatte, als sie, von der Ostsee um Afrika fahrend, Wladiwostok erreichen wollte.

Bei Landmaschinen ist kaum mehr als dreifache Expansion angewendet worden, am häufigsten wird wohl die zweifache Expansion verwendet.

Wir besprachen schon, daß man es nicht nötig hat, den verfügbaren Druck bis zur Grenze der Atmosphärenspannung auszunutzen, daß man in manchen Fällen den Dampf nur bis zu einem gewissen höheren Druck expandieren läßt, zu dem Zweck nämlich im allgemeinen, dadurch den Dampf für Heizzwecke mit einer höheren Temperatur zu gewinnen. Man kann also den Dampf, den man der Maschine mit 12 Atm. Druck zuführt, statt bis auf Atmosphärenspannung nur bis auf 1 Atm. Überdruck expandieren lassen. Dann kann man aber den aus einem Zylinder der Maschine mit 1 Atm. austretenden Dampf auch noch zur Speisung eines weiteren Zylinders verwenden. So erhält man die Verbundmaschine, in deren Hochdruckzylinder der Dampf von der Kesselspannung bis auf einen gewissen mäßigen Druck von oft etwa 1 Atm. expandiert, in deren Niederdruckzylinder der Dampf von 1 Atm. Spannung weiterhin sich ausdehnt. Jeder der beiden Zylinder wird gesteuert genau wie der eine Zylinder der einfachen Maschine, mit Schiebern, Ventilen oder Hähnen. Gelegentlich gibt man dem Rohr zwischen beiden Zylindern eine Erweiterung, die man dann als den Aufnehmer bezeichnet. Der Aufnehmer spielt dem Hochdruckzylinder gegenüber die Rolle der Atmosphäre, in die der Dampf entweicht, dem Niederdruckzylinder gegenüber die Rolle des Kessels.

Durch die beiden Zylinder muß das gleiche Dampfgewicht hindurchgehen, das sich aber im Niederdruckzylinder bei geringerer Spannung befindet als beim Hochdruckzylinder. Daraus folgt, daß der Niederdruckzylinder größer sein muß als der Hochdruckzylinder. Auf welchen Wert sich der Aufnehmerdruck einstellt, ob er also, wie

angenommen, gerade 1 Atm. Überdruck betragen wird, hängt von den Abmessungen der Zylinder und von der Steuerung ab.

Der Niederdruckzylinder entläßt den Dampf entweder in die Atmosphäre oder in einen Kondensator, je nachdem die Maschine mit Auspuff oder mit Kondensation arbeiten soll.

Die Indikator-Diagramme einer Verbundmaschine, und zwar mit Kondensation laufend, sind in Abbildung 68 wiedergegeben. Das Hochdruckdiagramm geht nicht bis auf die Atmosphärenlinie herab. Daß der höchste Druck im Niederdruckdiagramm höher erscheint als der Gegendruck des Hochdruckdiagramms, kommt natürlich daher, daß beide Diagramme mit verschiedener Feder indiziert sind, um jedesmal, trotz der verschiedenen Drucke, die Papierhöhe möglichst auszunutzen. Die Länge der beiden Diagramme ist gleich, weil die Indikatortrommel beidemal von demselben Kreuzkopf aus angetrieben wurde. Die Wege des Kolbens sind also bei beiden Diagrammen im gleichen Maßstab aufgetragen. Wollte man aber das Diagramm nicht als Kraft-Weg-Diagramm ansehen, sondern als Druck-Volumen-Diagramm, so würden nun die verschiedenen Volumina der beiden Zylinder nicht richtig dargestellt sein. Als Druck-Volumen-Diagramm passen die beiden Diagramme nach beiden Richtungen hin nicht maßstäblich zueinander.

Beim Ermitteln der Arbeit oder Leistung aus den indizierten Diagrammen wird die Leistung jedes der Zylinder festgestellt, und beide Leistungen werden zusammengezählt. Man sieht, daß, wollte man die ganze Arbeitsfläche in einem Zylinder erhalten, dieser die Größe des Niederdruckzylinders haben müßte.

Man könnte fragen, was für Vorteile denn die Zerlegung des sonst auch in einem Zylinder ausnutzbaren Druckgefälles bringe. Theoretisch sind in der Tat keine besonderen Vorteile von der Verbundwirkung zu erwarten. Trotzdem ergibt sich eine nicht unerhebliche Dampfersparnis durch Anwendung der Verbundwirkung, und zwar aus dem Grunde, weil in jedem Zylinder der Dampf weniger weit wechselnde Druckstufen und entsprechend weniger weit wechselnde Temperaturstufen bei jedem Hube durchmißt. Es treten nämlich Verluste bei der Dampfmaschine dadurch auf, daß der einströmende Dampf in den Zylinder kommt, in dem während des letzten Teils des vergangenen Hubes Dampf niedriger Spannung und niedriger Temperatur gewesen ist. Daher müssen sich die Wände erst anwärmen, und der auf diese Anwärmung verwendete Dampf ist für die Arbeitsleistung verloren. Diese Wandungsverluste sind bei der Einzylinder-Maschine sehr erheblich, bei der Verbundmaschine bedeutend geringer. Jeder Wärmeaustausch des Dampfes mit der Wandung ist aber ein Verlust, weil er ein irreversibler Vorgang ist (S. 70).

Ob es sich darum rechtfertigt, eine Verbundmaschine anzuschaffen, ist noch nicht gesagt. Eine Maschine mit zwei Zylindern, deren einer überdies so groß ist, wie auch ein einzelner sein müßte, wird teurer in der Beschaffung als eine Einzylinder-Maschine. Und es tritt immer wieder die gleiche Erwägung ein, ob denn die Dampfersparnisse, die mit der Beschaffung einer Verbundmaschine verbunden sind, groß genug sind, um die Verzinsung und Amortisation des mehraufgewendeten Kapitals zu decken oder vielmehr zu übertreffen. Nur wenn die Maschine genügend lange im Jahr läuft, wird sie imstande sein, diese Mehrkosten abzuarbeiten.

Auch in den Dampfturbinen findet im allgemeinen eine Teilung des insgesamt verfügbaren Druckgefälles statt: der Dampf expandiert dann nicht, wie in Abbild. 48 für eine Laval-Turbine dargestellt war, in einer Düse auf den Enddruck, worauf die Geschwindigkeit in einem Rade ausgenutzt wird, sondern meist läßt man die Expan-

sion oder aber die Ausnutzung der Geschwindigkeit stufenweise, in mehreren Absätzen erfolgen, man schaltet also mehrere Düsen abwechselnd mit mehreren Laufrädern hintereinander. Der Vorgang entspricht der mehrfachen Expansion der Kolbenmaschine, die Teilung wird aber zu ganz anderem Zwecke vorgenommen, nämlich um auf geringere Umlaufzahl der Räder zu kommen. Denn von einem Wandungsverlust kann bei der Dampfturbine nicht in dem Sinne die Rede sein wie bei Kolbenmaschinen, da keine Stelle der Maschine periodisch mit Dampf wechselnder Temperatur zusammenkommt.

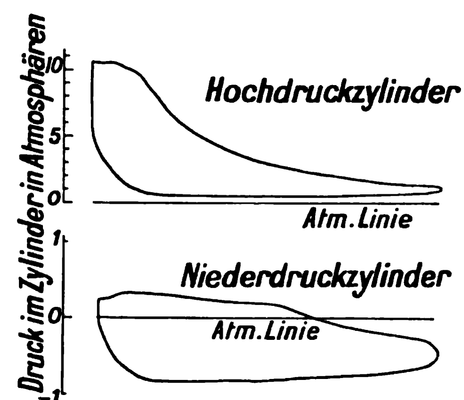


Abbildung 68. Indikatordiagramme einer mit Kondensation arbeitenden Verbund-Dampfmaschine. Jeder der beiden Zylinder liefert zwei Diagramme (von Kurbel- und Deckelseite), von denen nur eins gegeben ist.

Außerdem sei noch kurz erwähnt, daß nicht die gleiche Dampfmenge durch alle Zylinder einer Kolbendampfmaschine, durch alle Stufen einer Dampfturbine zu gehen braucht. Man kann dem Aufnehmer oder der Kammer zwischen zwei Turbinenstufen einen Teil des Dampfes entnehmen und zu Heizzwecken benutzen, sofern man durch Wahl der Zylinder- oder Schaufelabmessungen dafür sorgt, daß in jenem Raume gerade der zur Heizung erforderliche Druck herrscht, entsprechend der verlangten Heiztemperatur. Man wird erkennen, daß durch die Verwendung solcher Anzapfmaschinen eine große Mannigfaltigkeit in die Möglichkeiten der Abdampfausnutzung kommt. Man kann sich vorzüglich an die Verhältnisse des einzelnen Falles anpassen; allerdings erfordert die richtige Wahl der Betriebsart um so mehr Überblick über die in Frage kommenden Möglichkeiten, je zahlreicher die Möglichkeiten sind, und wenige Gebiete der projektierenden Tätigkeit sind schwieriger als gerade das hochmoderne der Abdampf- und Zwischendampfverwertung.

Noch eine weitere Möglichkeit sei erwähnt: man braucht sich auch nicht für das ganze auszunutzende Druckgefälle an eine Maschinenart zu halten. Man kann für einen beliebigen oberen Teil des Gefälles eine Kolbenmaschine verwenden, die den Dampf etwa von 12 Atm. bis zur Atmosphärenspannung ausnutzt, kann beliebig Dampf von Atmosphärenspannung zum Heizen entnehmen und den Rest in einer Dampfturbine ausnutzen. Solche Anordnung ist sogar recht zweckmäßig, da die Stärke der Kolbenmaschine in den oberen, die der Turbine in den unteren Druckstufen liegt — weil nämlich die gute Ausnutzung der niederen Drucke bis zum besten Vakuum in der Kolbenmaschine auf untunlich große Zylindervolumina führt (S. 95), entsprechend der geringen Dichte des Dampfes, während anderseits die Dampfturbine in den oberen Druckstufen mit kleinen Schaufellängen und großen Spaltverlusten zu kämpfen hat.

So hat man zum Beispiel den Abdampf von Dampfhämmern in einer Dampfturbine ausgenutzt, unter Zwischenschaltung eines Dampfspeichers, um einen Ausgleich dafür zu schaffen, daß die Dampfhämmer nicht dauernd arbeiten, während die Turbine meist gleichmäßig Licht oder Kraft liefern soll.

Wir wollen das weite und in den letzten Jahren stark gepflegte Gebiet der Abdampf- und Zwischendampfverwertung noch durch eine Wirtschaftlichkeitsberechnung erläutern, wie sie für solche Fälle typisch ist; wir müssen uns aber auf einen der einfachsten Fälle beschränken.

VERGLEICHENDE WIRTSCHAFTLICHKEITSBERECHNUNG. Die Anwendung der Kondensation ermöglicht bei gegebenem Anfangsdruck des Dampfes eine Vermehrung der Arbeitsausbeute, eine Erhöhung des Wirkungsgrades der Maschine. Das geschieht aber auf Kosten der Ausnutzbarkeit der noch verbleibenden Wärme für Heizzwecke. Denn die Siedetemperatur oder Kondensationstemperatur von Wasserdampf sinkt, wenn der Druck sinkt, und daher kondensiert beispielsweise bei 0,1 Atm. absolutem Druck der Dampf erst bei einer Temperatur von 45° C. Mit der Wärme, die uns bei dieser niedrigen Temperatur zur Verfügung gestellt wird, kann man nicht sehr viel anfangen, sie ist verloren. Für Kochzwecke braucht man stets höhere Temperaturen; für die eigentlichen Heizzwecke, zum Beheizen von Wohnräumen, würde man zwar mit diesen Temperaturen auskommen, weil man die Räume nur auf etwa 20° C beheizt, aber man würde die in den Räumen aufzuwendende Heizfläche sehr groß machen müssen — die Anlage würde unförmlich und teuer.

Deshalb verwendet man nur selten Kondensationsbetrieb mit Abdampfausnutzung, obwohl an sich beide Dinge einander nicht widersprechen. Meist aber steht man vor der Frage, ob es zweckmäßiger ist, mit Kondensation zu arbeiten oder mit Abdampfausnutzung.

Man hat die Wahl, den hochgespannten Dampf entweder nur bis zur Atmosphärenspannung herunter zur Arbeitserzeugung und von da ab zur Heizung auszunutzen — man erhält dann eine mäßige Arbeitsausbeute, es bleibt aber nichts von der Wärme des Dampfes ungenutzt, sondern der ganze Rest wird für die Heizung nutzbar —, oder aber man kann durch Anwendung des Kondensationsbetriebes die Arbeitsausbeute um etwa 50% steigern, muß aber den verbleibenden Rest an Wärme, der immerhin noch etwa 70% der ursprünglichen Wärmeerzeugung ausmacht, verloren geben und den Wärmebedarf für Heizung besonders erzeugen. Zwischen beiden Betriebsarten hat man die Wahl, und es fragt sich, bei welcher Betriebsart man besser fährt.

Man hat dabei zweierlei zu beachten, nämlich erstens die Anlagekosten, die späterhin verzinst und abgeschrieben werden müssen, und fernerhin die Betriebskosten. Die Anlagekosten werden größer bei Beschaffung der Kondensationsmaschine, die durch die Kondensationsanlage und wegen des erforderlichen größeren Zylindervolumens teurer wird. Namentlich dann werden die Kosten erheblich höher, wenn man kein gutes Kühlwasser zur Hand hat und deshalb eine Rückkühlung beschaffen muß; diese macht sich nicht ganz leicht bezahlt, da sie in der Beschaffung kostspielig ist und weil sich durch ihr Vorhandensein der mit der Kondensation erzielbare Gewinn erheblich verringert: muß ja doch das Kühlwasser dauernd auf den Kühlturm gepumpt werden, von dem es nutzlos herabfällt. Anderseits spricht zugunsten der Kondensation der Minderverbrauch an Kohlen, der für eine bestimmte zu erzeugende Arbeitsmenge, in Pferdekraftstunden gemessen, zu erwarten ist. Nun ist wohl zu beachten, daß die Beschaffungskosten verzinst werden müssen, unabhängig davon, ob die Anlage läuft oder nicht, und selbst die Abschreibungen (Amortisation) ruhen jedenfalls nicht ganz, wenn die Maschine nicht läuft. Die Dampfersparnisse, die die vollkommenere Maschine erwarten läßt, treten aber nur so lange ein, wie die Maschine läuft, und in voller Größe im allgemeinen nur, wenn sie vollbelastet läuft. Nur dann also, wenn die Anlage genügend stark benutzt werden wird, ist es geraten, die bessere und teurere Maschine anzuschaffen.

In kritikloser Beurteilung der Maschinen nur nach dem Dampfverbrauch wird viel gesündigt. Zur wirtschaftlich richtigen Auswahl der richtigen Maschinengattung, je

nach den gerade vorliegenden Verhältnissen örtlicher und geschäftlicher Natur, gehört sicherer Überblick über das ganze Fachgebiet, zumal wenn es sich nicht nur um die Auswahl zwischen Kondensations- und Auspuffbetrieb handelt, sondern noch die vielfältigen anderen Möglichkeiten zu erwägen sind: Dampf- oder Verbrennungskraftmaschine, Kolbenmaschine oder Turbine, Abwärmeausnutzung oder nicht und in welcher Weise.

Sowenig wir im vorhergehenden die verschiedenen Gesichtspunkte erschöpfen, ja auch nur alle andeuten konnten, so wenig kann folgende Rechnung Anspruch auf Vollkommenheit machen, die nur den Gang der Erwägungen veranschaulichen soll.

Es soll eine Dampfkraftanlage von 120 PS beschafft werden. Offeriert sind eine Verbundmaschine mit Kondensation und eine Auspuffmaschine, bei der letztere durch wesentlich geringeren Preis besticht, obwohl sie 10 kg Dampf für die abgebremste (nicht für die indizierte) Pferdekraftstunde verbrauchen soll, die andere nur 6 kg. Die Preise stellen sich wie folgt:

	Verbundmaschine mit Kondensation	Einzylinder-Auspuffmaschine
Preis der Maschine für 120 PS Nutzleistung	22000 M.	15000 M.
Preis des Kessels:		
für 120 × 10 = 1200 kg Dampf stündlich .		6000 „
für 120 × 6 = 720 kg Dampf stündlich .	5000 „	
Preis der Rückkühlanlage	7000 „	
Gesamtbeschaffungskosten	34000 M.	21000 M.

Unterschied: 13000 M.

Dabei können etwaige Unterschiede in den Kosten von Baulichkeiten insofern außer Ansatz bleiben, als es sich um den Ersatz einer vorhandenen Maschine handelt, so daß also Gebäude, für beide Fälle ausreichend, vorhanden sind.

Maßgebend für die Beurteilung ist, wie schon erwähnt, namentlich die Laufdauer. Nach den Erfahrungen des bisherigen Betriebes rechne man darauf, daß die Maschine an im ganzen 300 jährlichen Arbeitstagen täglich 5 Stunden vollbelastet läuft, also mit 100 PS — die weiteren 20 PS sind nur als Reserve gedacht —, und weiter, daß die Maschine noch 3 Stunden mit halber Last, etwa 50 PS im Mittel, belastet ist. Die Richtigkeit dieser Annahmen — die freilich selbst bei vorhandenen Betrieben oft stark in der Luft schweben — vorausgesetzt, hätte man also auf folgende Arbeitserzeugung zu rechnen:

bei Vollast: $300 \times 5 \times 100 = 150000$ PS-St.
bei Halblast: $300 \times 3 \times 50 = 45000$ „
Im ganzen jährlich 195000 PS-St.

Da wir die Pferdekraftstunde bei Kondensationsbetrieb mit 6, bei Auspuff aber mit 10 kg Dampfaufwand erzeugen, so haben wir einen Mehrverbrauch — auf den allein es ankommt — von 4 kg Dampf für jede Pferdekraftstunde, im ganzen $195000 \times 4 = 780000$ kg Dampf jährlich, wenn wir die in der Beschaffung billigere Maschine wählen.

Bevor wir die Frage erörtern, ob dies zweckmäßig ist, wäre die Vorfrage zu erledigen, ob es überhaupt möglich ist; beispielsweise könnte der Mangel an gutem Wasser, der ja offenbar vorhanden ist, sonst würden wir keine Rückkühlung anwenden, so groß sein, daß wir die 780000 kg mehr an Wasserbedarf zum Kessel-

speisen nicht aufzubringen wissen. Das ist nun aber nicht der Fall, es ist genügend Wasser da.

Dann ist die Dampfersparnis von 780000 kg bei Kondensationsbetrieb insofern zu reduzieren, als die Kondensation, namentlich die Kühlwasserpumpe, Dampf verbrauchen wird. Sie verbraucht 6 PS, das wird, wenn wir sie von der Hauptmaschine aus antreiben lassen, diese mit 8 PS belasten, weil die Übertragung einen Wirkungsgrad kleiner als 1 hat. Man darf bei solchen Rechnungen nie vergessen, die Wirkungsgrade zu berücksichtigen. Die 8 PS werden während der ganzen Laufdauer von 2400 St. gebraucht, ob nun die Hauptmaschine mit voller oder halber Last läuft; ja selbst wenn sie leer liefe, würde er sich kaum vermindern. Es sind also $8 \times 6 \times 2400 = 115000$ kg Dampf für den Betrieb der Kondensation aufzuwenden. Dann bleibt immerhin eine jährliche Dampfersparnis von $780000 - 115000 = 665000$ kg bestehen.

Die jährliche Dampfersparnis läßt sich in Geldeswert umrechnen. Unter Beachtung des Kesseltyps und der am Ort verfügbaren Kohlensorte möge man darauf rechnen, mit 1 kg Kohle 7 kg Dampf zu erzeugen: man rechnet auf 7fache Verdampfung. Dann spart man jährlich $665000 : 7 = 95000$ kg Kohle. Der Preis der Tonne (1000 kg) Kohle ist 25 M., einschließlich der Anfuhr zum Kesselhaus. So spart man jährlich $95 \times 25 = 2375$ M. an Kohlen, wenn man die in der Beschaffung teurere Maschine wählt.

Bevor man mit diesen Zahlen die vergleichende Übersicht aufstellen kann, wird man noch erwägen, ob beide Maschinen gleich viel Personal brauchen. Das wird wohl der Fall sein. Zwar sind beim Auspuffbetrieb im Kesselhaus mehr Kohlen zu verfeuern, der Kesselheizer wird also mehr zu tun haben. Es handelt sich im einen Falle um 90, im anderen Falle um 140 kg Kohlen stündlich, die beide ein Heizer bewältigen kann. Es könnte aber auch der Grenzfall vorkommen, wo man des vermehrten Kohlenverbrauchs wegen einen weiteren Heizer — wenigstens einen Kohlenschlepper — mehr einstellen muß, was dann schwer ins Gewicht fiele. Auch an der Maschine wird ein Maschinist genügen bei der einen wie bei der anderen Betriebsart.

Endlich liegt auch kein Anlaß vor, bei einer der Maschinen auf erheblich höheren Verbrauch an Schmiermaterial zu rechnen.

Unter diesen einfachen Umständen bleibt also nur noch die Frage, ob die Dampfersparnis oder ob der Aufwand für Verzinsung und Abschreibung des Kapitalmehraufwandes überwiegt. Man wird die aufgewendeten Kapitalien mit 5% verzinsen müssen und wird als Abschreibung nicht wohl weniger als 10% einführen dürfen; diese Abschreibungsquote setzt einen zehnjährigen Betrieb voraus — in dieser Zeit wird der Kühlturm jedenfalls stark der Instandsetzung mindestens durch neuen Anstrich bedürfen. Also lasten 15% jährlich auf dem Kapitalaufwande von 13000 M., entsprechend 1950 M. Jahresaufwand.

Einer Kohlenersparnis von 2375 M. bei Kondensationsbetrieb steht also ein Mehraufwand für den Kapitaldienst von 1950 M. gegenüber — der wirkliche Gewinn von 425 M. jährlich ist in Anbetracht des Objektes selbst dann nicht eben erheblich, wenn, wie bisher der Fall, von einer Ausnutzung des Abdampfes gar nicht die Rede ist.

Unbedingt für den Auspuffbetrieb wird man sich in diesem und manchen anderen Fällen dann entscheiden, wenn die Möglichkeit vorliegt, den Abdampf für Heizzwecke stets oder doch während einer erheblichen Zeit des Jahres auszunutzen.

Diese kurzen Notizen mögen genügen, um einen Begriff von den meist recht schwierigen wirtschaftlichen Erwägungen zu geben, die beim Entwurf größerer Kraftwerke vorkommen.

VERBRENNUNGS-KRAFTMASCHINEN. In den letzten Jahren haben die Verbrennungs-Kraftmaschinen eine früher nicht geahnte Wichtigkeit erlangt. Erst in den sechziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts gelang es Nikolaus Otto, dem Begründer der Gasmotorenfabrik Deutz, eine für damalige Begriffe mit mäßigem Gasverbrauch arbeitende Gasmaschine zu bauen, die einen Arbeitsprozeß ausführte, wie wir ihn in Abbildung 38 dargestellt haben. Bald erkannte man, daß es, wie bei Heißluftmaschinen, so auch bei Verbrennungs-Kraftmaschinen von Vorteil ist, die arbeitenden Gase vor Zuführung der Wärme zu komprimieren.

Der Kreisprozeß der Gasmaschinen wird daher in der Weise geführt, daß man Luft, gleich mit dem Brennstoff gemischt, von außen ansaugt, das Gemisch beim Rückgang des Kolbens komprimiert und es dann durch einen elektrischen Funken entzündet. Nachdem in dieser Weise die Wärmezufuhr veranlaßt ist, dehnen sich die Gase aus, geben ihre Expansionsarbeit an den Kolben ab, worauf das Ausstoßen der verbrannten Gase erfolgt, das, wie wir wissen, die Wärmeabführung ersetzt. Nun wird frisches kaltes Gemisch eingesogen, und der Prozeß wiederholt.

Der Kreisprozeß unterscheidet sich von dem der Heißluftmaschinen hauptsächlich dadurch, daß die Wärmezufuhr durch innere Verbrennung erfolgt, während die Wärme bei der Heißluftmaschine durch Feuer zugeführt wird. So gleichgültig das in rein thermischer Hinsicht ist, so wichtig ist es in praktischer. Es ist ein Vorteil der Gasmaschine, daß man im Zylinder durch die Entzündung eine plötzliche Wärmezufuhr erreicht, daher auf höhere Verbrennungstemperaturen kommt, ohne daß doch die Wände des Zylinders allzu warm werden, die man durch Wasser kühlen kann, ohne übermäßige Wärmeverluste in der kurzen Zeit der Expansion befürchten zu müssen. Bei der Heißluftmaschine, bei der sich die Wärmezufuhr langsamer abspielt, ist es nicht wohl möglich, Kühlung anzubringen, die in der langen Zeit einen überwiegenden Teil der Wärme abführen würde.

Im übrigen ist es auch bei der Gasmaschine möglich, den ganzen Arbeitsprozeß sich in zwei hintereinandergeschalteten Zylindern abspielen zu lassen, so, wie es bei der Heißluftmaschine häufig der Fall ist, indem man in einem Zylinder die Kompression vonstatten gehen läßt, in einem Behälter die komprimierten Gase ansammelt, sie dann in den Arbeitszylinder treten läßt, wo sie zur Entzündung gebracht werden und die Expansionsarbeit leisten. Wie bei der Heißluftmaschine ist ein Arbeitsgewinn dadurch zu erwarten, daß der Arbeitskolben größere Fläche hat als der Kompressionskolben, auch kann in diesem Falle — im Gegensatz zur Heißluftmaschine — durch die Verbrennung eine erhebliche Drucksteigerung hervorgerufen werden, die zu einer größeren Arbeitshergabe des Kraftzylinders gegenüber dem Arbeitsverbrauch des Kompressionszylinders führt. Nach diesem Verfahren arbeiten die Zweitaktmaschinen, die sich in den letzten zehn Jahren als Großgasmaschinen stark entwickelt haben.

Das übliche ist indessen bei der Verbrennungs-Kraftmaschine die Durchführung des ganzen Prozesses in nur einem Zylinder, der dann im Viertakt arbeitet. Wir erkennen die Wirkungsweise der üblichen Viertakt-Gasmaschine, wenn wir ihr Indikatordiagramm betrachten (Abbildung 69). Wieder haben wir den Kolben der Maschine, im Zylinder laufend, der unter dem Einfluß des Kurbeltriebes und zeitweise vom Schwungrad durchgezogen immer den gleichen Kolbenhub vorwärts und rückwärts durchmißt. Dabei spielen sich die eben schon besprochenen Vorgänge ab, die das Indikatordiagramm in der Tat erkennen läßt. Im Punkte E beginnt das Ansaugen des Gasluftgemisches, wobei natürlich der Kolben, vom Schwungrad durchgezogen,

einen schwachen Unterdruck im Zylinder erzeugen muß, um die Luft zum Eintreten zu veranlassen. Während der Ansaugeperiode EA ist das Einlaßventil durch die Steuerung der Maschine geöffnet. Es schließt im Diagrammpunkt A den Eintritt ab, und wenn der Kolben nun zurückgeht, wird das Gemisch komprimiert, der Indikator beschreibt die Kompressionskurve AB, der Druck steigt bei abnehmendem Volumen. Wenn der Kolben wieder im „inneren" Totpunkt angekommen ist, bei dem in E das Diagramm begann, so erfolgt, diesmal im Punkte B des Diagramms, die Zündung. Man hat sich das Verbrennen des Gasluftgemisches nicht etwa als explosionsartig erfolgend vorzustellen, sondern es bedarf für die Verbrennung einer merklichen Zeit, wie man schon aus dem schrägen Anstieg der Verbrennungslinie BC erkennen kann. Bei C etwa ist die Verbrennung beendet, und es setzt, indem der Kolben weiter nach auswärts geht, die Expansion der verbrannten heißen Gase ein, die bei G, im äußeren Totpunkt des Kolbens, noch keineswegs beendet ist: sie könnte noch nach der Linie GD weiterhin fortgeführt werden, bis die Atmosphärenlinie erreicht ist. Aber die erreichbare Arbeitsfläche ist verhältnismäßig klein, und um sie zu gewinnen, müßte man die Zylinderabmessungen auf über das Doppelte steigern. Da wäre zu befürchten, daß die Reibungsverluste der größeren Maschine den Arbeitsgewinn aus dieser kleinen noch zu gewinnenden Arbeitsfläche mehr als aufzehren könnte, auch kann ja der Kolben beim Expansionshub nicht wohl einen größeren Hub machen als beim Ansaugen. Man bricht daher die Expansion im Punkte G ab, öffnet das Auslaßventil, so daß der Druck auf die Atmosphärenspannung sinkt, und läßt nun bei geöffnetem Auslaßventil die verbrannten Gase ausstoßen; Linie HE liegt etwas über der Atmosphärenlinie, denn der Druck im Zylinder ist um den Widerstand der Auspuffleitung größer als der Atmosphärendruck.

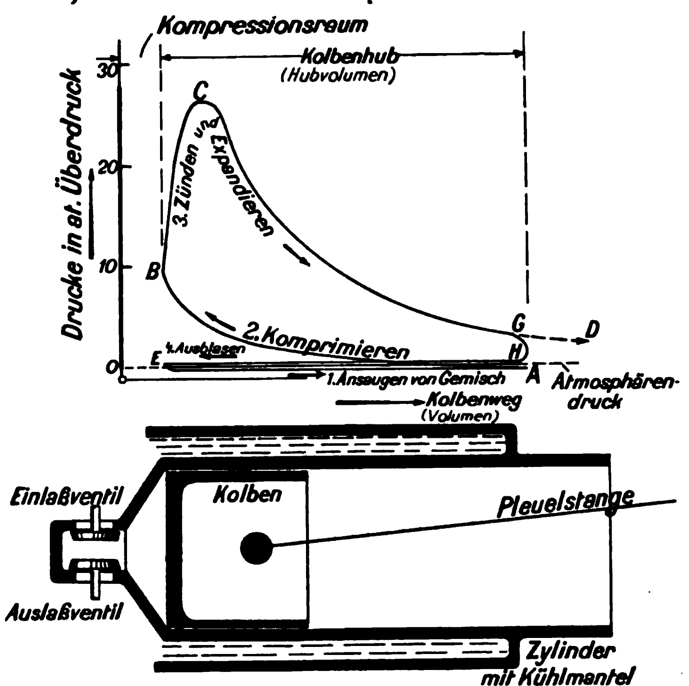


Abbildung 69. Schematischer Schnitt durch den Zylinder einer einfach wirkenden Viertakt-Gasmaschine nebst zugehörigem Druck-Volumen-Diagramm.

Abbildung 70 zeigt uns das mit dem Indikator wirklich aufgenommene Diagramm, und zwar unter a ein volles Diagramm, das ganz den Charakter der Abbildung 69 hat. Es sind zwei aufeinanderfolgende Arbeitsspiele indiziert, bei denen die Verbrennung recht verschieden verläuft; das ist meist so. Unter b finden wir den unteren Teil des Diagramms — die sogenannte Ansaugeschleife, die einen Arbeitsaufwand darstellt — in größerem Druckmaßstab dargestellt: es ist eine weiche Indikatorfeder verwendet worden, die freilich für die hohen Drucke nicht ausreicht: der Indikatorkolben hat oben angeschlagen, und man hat sich das Diagramm oben weit fortgesetzt zu denken. Die Ermittelung der

Arbeit aus dem Indikatordiagramm geschieht bei der Gasmaschine ähnlich wie bei der Dampfmaschine, die Ansaugeschleife ist als Verlust von der Arbeitsfläche abzuziehen. —

In dieser Weise arbeiten die Viertaktmaschinen, die in weiterer Ausbildung der atmosphärischen Maschinen in den siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts von Otto angegeben wurden und die sich als Kleinmotoren in den achtziger und neunziger Jahren ein weites Feld eroberten; dem Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts blieb es vorbehalten, die Viertakt-Verbrennungsmaschine auch als Großgasmaschine brauchbar auszugestalten, so daß heute Viertaktmaschinen von mehreren Tausend Pferdestärken Leistung keine Seltenheit sind. Das bunte Bild zeigt uns einen dieser modernen Riesen.

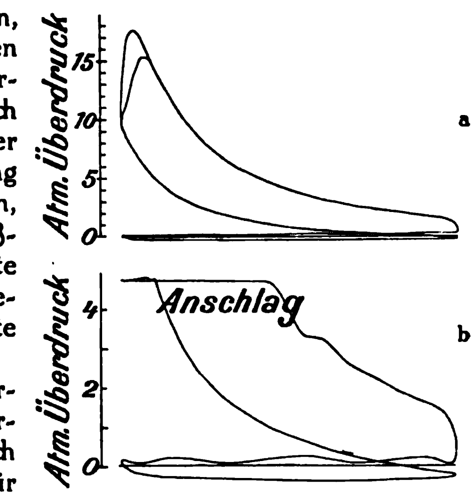


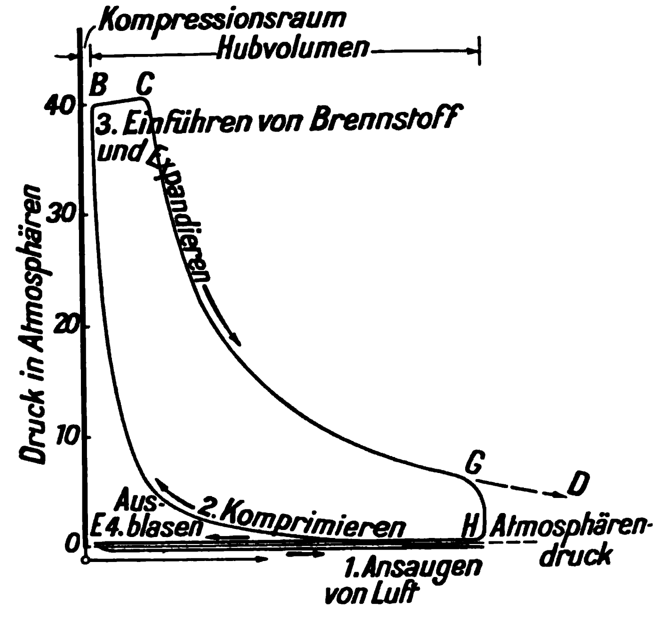
Abbildung 70. Indikatordiagramm einer Viertakt-Gasmaschine. a Ganzes Diagramm, bestehend aus der Arbeitsfläche und der (umgekehrt umfahrenen) Verlustfläche. — b Teildiagramm mit schwacher Indikatorfeder aufgenommen: die Verlustfläche daher deutlicher, der obere Teil der Arbeitsfläche durch Anschlagen des Indikatorkolbens an eine Hubbegrenzung fortgefallen.

Als Brennstoff für die Gasmaschine kam ursprünglich nur das Leuchtgas in Frage, das überall in Städten zu haben ist. Und gerade dadurch wurde die Verwendbarkeit der Gasmaschine für das Kleingewerbe begünstigt, daß sie diesen bequem und ohne Bedienung verfügbaren Brennstoff zu verarbeiten gestattet. Allerdings ist Leuchtgas kein billiger Brennstoff: das Kubikmeter Leuchtgas kostet etwa 12 Pf. und liefert 5000 Kal. Wärme, so daß also 1000 Kal. auf etwa $2\frac{1}{2}$ Pf. zu stehen kommen. Kohle oder Koks hingegen bezahlt man mit etwa 3 Pf. für das Kilogramm, das Kilogramm liefert 7000 Kal., so daß sich 1000 Kal. nur auf etwa $\frac{1}{2}$ Pf. stellen. Der Preisunterschied ist so, daß man selbst auf Kosten eines erheblich schlechteren Wirkungsgrades die Möglichkeit der Verwendung fester Brennstoffe als Fortschritt ansehen mußte. Es ist nicht Sache dieses Abschnitts, zu besprechen, in welcher Weise die Vergasung fester Brennstoffe in den Sauggaserzeugern gelang, die Koks und neuerdings auch Kohle bei mäßigem Verlust an Heizwert in brennbare und für die Gasmaschine brauchbare Gase verwandeln, und zwar mit so einfachen Mitteln, daß Sauggasanlagen im kleinsten Betriebe ohne wesentliche Aufsicht zu arbeiten vermögen. Nur so viel sei erwähnt, daß die Gasmaschine Luft durch eine glühende Koksschicht saugt, die sich durch die Verbrennung selbst im Glühen erhält und die unvollkommen zu Kohlenoxyd verbrannt wird, und daß das brennbare Kohlenoxydgas vom Motor, gemischt mit Luft, angesogen und entzündet wird. Während bis vor einigen Jahren nur die Verwendung von Koks zur Sauggaserzeugung möglich war, ist es in den letzten Jahren auch gelungen, Stein- und Braunkohlen zu verwenden, die noch billiger sind, die aber früher wegen ihres Bitumengehalts der Verwendung in der Sauggasanlage Schwierigkeiten entgegenstellten, aus den gleichen Gründen, aus denen man sie im eisernen Füllofen nicht verwenden kann. Ja selbst die Vergasung von Torf ist gelungen, so daß man die Hoffnung hegen darf, daß die in unserem Vaterland vorhandenen großen Torfmoore noch einmal eine reichlich fließende Energiequelle abgeben werden.

Ein wichtiger Brennstoff für die Gasmaschine ist endlich das Hochofengas, das als Nebenprodukt des der Eisengewinnung dienenden Hochofens in großen Quantitäten abfällt und das früher meist nutzlos in die Atmosphäre gelassen wurde. Heute wird

es aufgefangen und leistet in Gasmaschinen nicht nur die für den Hochofenbetrieb selbst nutzbare Arbeit, sondern erzeugt außerdem gewaltige Mengen elektrischer Energie, die nach außen an Abnehmer abgegeben werden können. Gerade von Hochöfen aus werden heute die größten Gasmaschinen betrieben.

Dagegen ist in seiner ältesten Domäne, in kleineren gewerblichen Betrieben, die Gasmaschine trotz der Fortschritte der Sauggaserzeugung durch den sauberen Elektromotor stark verdrängt worden: sie wird mehr und mehr zur Großmaschine.



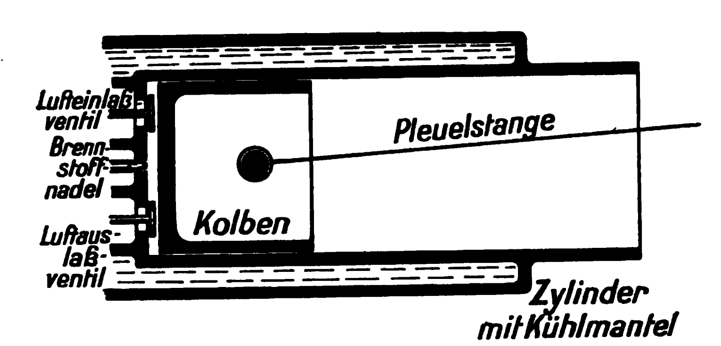


Abbildung 71. Schematischer Schnitt durch den Zylinder einer Dieselmaschine, nebst zugehörigem Druck-Volumen-Diagramm.

Außerdem spielt noch die Verwendung flüssiger Brennstoffe eine gewisse Rolle, die allerdings, um im Zylinder der gewöhnlichen Verbrennungsmaschine verwendet zu werden, vorher verdampft, d. h. also in gasigen Zustand verwandelt werden müssen. Meist geschieht das, indem man die Verbrennungsluft über den leichtflüchtigen Brennstoff (Benzin, Benzol, Spiritus) streichen läßt oder die Luft durch ihn hindurchsaugt, wobei durch Verdunstung unter günstigen Verhältnissen genügend Brennstoff mitgenommen wird. Unter Umständen ist die Erwärmung des Brennstoffs nötig, wenn derselbe nämlich bei gewöhnlicher Temperatur schwer verdunstet (Petroleum). Vor den Gasmaschinen haben die mit flüssigem Brennstoff arbeitenden Maschinen den Vorteil, das der schwerfällige Gaserzeuger fortfällt, und daß, weil nicht erst ein Gaserzeuger angeheizt zu werden braucht, die Maschine stets betriebsbereit ist.

Wesentlich anders als die bisher beschriebenen Verbrennungskraftmaschinen arbeitet die Dieselmaschine, die zur Verbrennung von Petroleum bestimmt ist, insbesondere von ungereinigtem (Masut oder Rohöl), das billiger ist, dessen teerige Bestandteile aber bei der im gewöhnlichen Viertakt arbeitenden Maschine insofern Schwierigkeiten machen, als sie den Maschinenzylinder und namentlich die Zündung verschmutzen. Anderseits ist man in der Höhe des anzuwendenden Kompressionsdrucks, den möglichst hochzutreiben im Interesse geringen Brennstoffverbrauchs liegt, bei den gewöhnlichen Viertaktmaschinen dadurch beschränkt, daß die

bei der Kompression auftretenden Temperaturen nicht höher sein dürfen als die Entzündungstemperatur des Gemisches, weil sonst das komprimierte Gemisch sich von selbst noch während der Kompression entzündet. Solche Vorzündungen geben zu unruhigem Gang der Maschine und selbst zu Gefahren Anlaß, indem schwere Stöße in das Getriebe kommen.

Dieser Schwierigkeiten wird die Dieselmaschine in folgender Weise Herr. Bei ihr wird nur Luft angesogen und beim Rückgang des Kolbens komprimiert. Die Kompression kann wegen des Fehlens von Brennstoff beliebig hochgetrieben werden: man komprimiert auf etwa 40 Atm. Überdruck, und die dabei auftretenden Temperaturen mögen bis gegen 1000° C heraufgehen. Nun wird der Brennstoff, Petroleum oder Rohöl, als feiner Strahl eingespritzt, er entflammt bei den hohen Temperaturen von selbst, so daß eine besondere Zündung nicht erforderlich ist. Bei den hohen Temperaturen werden selbst schwer siedende und stark rußende teerige Ölarten anstandslos vollkommen verbrannt; überdies ist die Maschine für das Ansetzen von Ruß weniger empfindlich als die gewöhnliche Verbrennungsmaschine, weil es hauptsächlich die Zündung ist, die infolge von Rußansatz den Dienst zu versagen pflegt; diese aber ist bei der Dieselmaschine gar nicht vorhanden. Das Einführen des Brennstoffes findet, um zu weit gehende Drucksteigerungen zu vermeiden, nicht plötzlich, sondern während einer längeren Zeit des Hubes statt und wird so bemessen, daß während dieser Zeit etwa der gleiche Druck erhalten bleibt. So nimmt das Indikatordiagramm der Dieselmaschine die Gestalt an, die Abbildung 71 uns zeigt: beim Rückgang des Kolbens bis B wird komprimiert, von B bis C findet durch Öffnen einer Brennstoffnadel das Einführen des Brennstoffes und von C bis G Expansion der verbrannten Gase statt, die dann ausgestoßen werden, in dem man wieder durch den Spannungsabfall GH ein Stück Diagrammfläche zugunsten kleiner Zylinderabmessungen preisgibt. Die beigeschriebenen Zahlen zeigen bedeutend höhere Drucke im Vergleich zu dem Diagramm der gewöhnlichen Verbrennungsmaschine (Abbildung 69). In Abbildung 72 sehen wir ein an einer Dieselmaschine wirklich aufgenommenes Diagrammpaar.

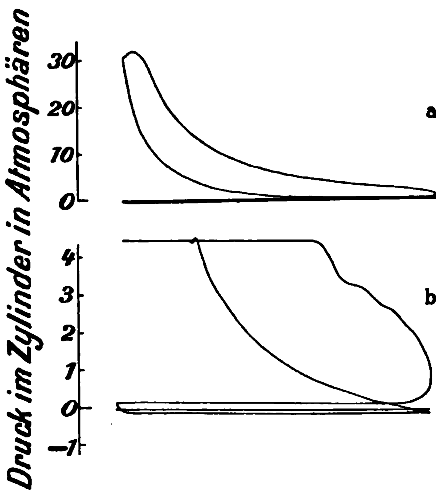


Abbildung 72. Indikatordiagramm einer Dieselmaschine.

a Ganzes Diagramm, b Schwachfederdiagramm } wie in Abbildung 70.

Weil beim Dieselverfahren während der Verbrennung keine oder doch keine nennenswerte Drucksteigerung auftritt, bezeichnet man die Maschinen auch als Gleichdruckmaschinen. Des Brennstoffs wegen spricht man auch von Ölmaschinen.

So einfach der Prozeß der Dieselmaschine zu sein scheint, so viel Schwierigkeiten hat es doch gemacht, ihn baulich richtig zu entwickeln. Die hohen auftretenden Drucke und die großen dabei ins Getriebe kommenden Kräfte, die Schwierigkeit, die Kompression weit genug zu treiben, und die Schwierigkeit, den Brennstoff durch eine Brennstoffnadel sicher und so einzuführen, daß er sich selbst entzündet, waren es hauptsächlich, die zu überwinden waren, die aber heute als überwunden gelten können. Seitdem vor wenigen Jahren die auf dem Dieselverfahren ruhenden Patente abgelaufen sind, haben eine große Anzahl erster Firmen den Bau der Dieselmaschine

aufgenommen, und ihre Verwendung hat eine Entwicklung genommen, an deren Ende wir noch nicht sind. —

Was die Betriebsergebnisse anbelangt, die man mit den Verbrennungsmaschinen erlangen kann, so liegen die Verhältnisse so, daß bei ihnen in der Maschine selbst ein erheblich größerer Bruchteil der Wärme in Arbeit umgesetzt wird als bei der Dampfmaschine: der thermische Wirkungsgrad ist erheblich höher, entsprechend der Tatsache, daß die Wärme bei der hohen Verbrennungstemperatur zugeführt wird, während ja bei der Dampfkraftanlage der größte Teil des Temperaturgefälles bereits im Kessel nutzlos verloren geht. Wenn wir uns über den Verbleib der zugeführten Wärme in gleicher Weise wie bei der Dampfmaschine mit Hilfe des Sankey-Diagramms einen Überblick verschaffen, so kommen wir, zunächst für die Sauggasmaschine, etwa auf das in Abbildung 73 dargestellte Bild. Bezeichnen wir die in den Sauggasgenerator in Form von Koks eingeführte Wärmemenge mit 100%, so geht davon ein Bruchteil von etwa 35%, rund ein Drittel, im Gaserzeuger (Sauggasgenerator) verloren. Der Rest steckt als Heizwert im Sauggas, das nun der Gasmaschine zugeführt wird; wir wollen die in ihm verfügbare Wärmemenge nun weiterhin als 100% bezeichnen. Dann wird — je nach Umständen natürlich stark wechselnd — etwa ein Drittel der im Gase verfügbaren Energie in indizierte Arbeit verwandelt. Von den verbleibenden zwei Dritteln wird etwa je die Hälfte dadurch nachgewiesen, daß einerseits die den Zylinder verlassenden Verbrennungsgase Wärme enthalten, diese Wärmemenge beträgt demnach auch etwa ein Drittel der zugeführten. Das verbleibende Drittel endlich geht durch die Wandungen des Zylinders hindurch in das Kühlwasser, das in dessen doppelter Wandung zu zirkulieren pflegt, um übermäßige Erwärmung der Zylinderwandung hintanzuhalten, um namentlich auch zu verhindern, daß das an den Wandungen haftende Schmieröl so weit erwärmt wird, daß es mit verbrennt oder seine schmierende Wirkung verliert, was dem Zylinder und dem Kolben verderblich wäre.

Abbildung 74 gibt das Sankey-Diagramm für eine Dieselmaschine und zeigt, daß rücksichtlich der Wärmeausnutzung die Gleichdruckmaschine an der Spitze aller Wärmekraftmaschinen steht. Bei ihr wird mehr als ein Drittel der Wärme ausgenutzt.

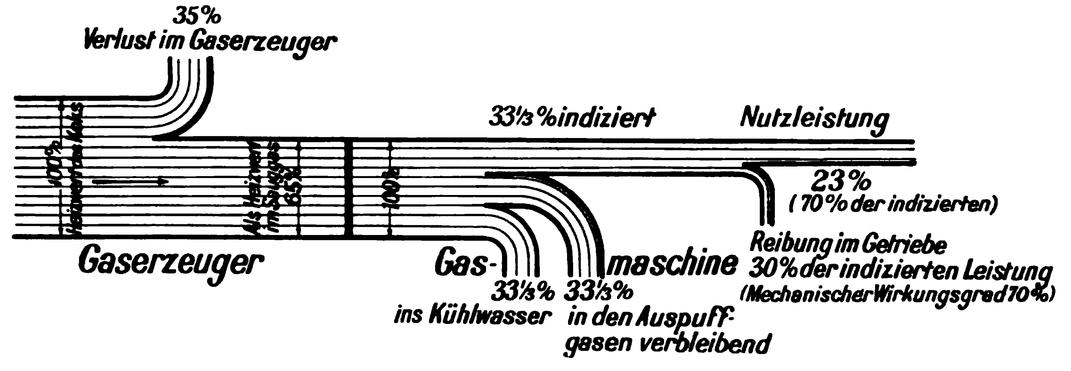


Abbildung 73. Sankey-Diagramm zum Nachweis des Wärmeverbleibs einer Sauggasanlage.

Die nicht umgesetzten rund zwei Drittel der Wärme stehen wie bei der Dampfmaschine so auch bei der Verbrennungskraftmaschine zu beliebiger Verwendung zur Verfügung, und zwar mit recht befriedigenden Temperaturen. Die den Zylinder verlassenden Abgase haben noch Temperaturen von 300 bis 400° C, das Kühlwasser ver-

läßt den Zylindermantel im allgemeinen mit einer Temperatur von etwa 40 bis 50°, doch kann man durch Vermindern der durchlaufenden Wassermenge die Temperatur bis gegen 100° steigern, ohne viel an der Kühlwirkung einzubüßen, und kann dadurch auch beim Kühlwasser auf Temperaturen kommen, die eine weitere Ausnutzung der Wärme gestatten. Eine solche Ausnutzung wäre sowohl zu Heizzwecken als auch zum Betriebe von Abdampfturbinen denkbar, wenngleich man bei den Gasmaschinen bisher weniger auf Abwärmeausnutzung bedacht gewesen ist als bei Dampfmaschinen, bei denen ja die allzu ungünstige Ausnutzung der verfügbaren Wärme viel sinnfälliger ist.

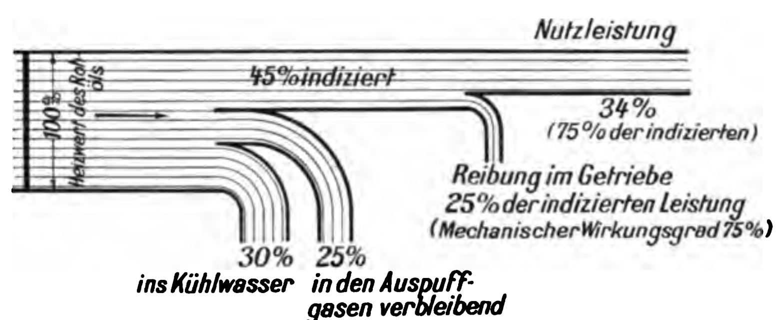


Abbildung 74. Sankey-Diagramm für eine Dieselmaschine.

Trotz höheren thermischen Wirkungsgrades hat es die Verbrennungskraftmaschine in wirtschaftlicher Hinsicht zu unbedingtem Erfolg gegenüber den Dampfkraftmaschinen nicht gebracht, hauptsächlich, weil man unter Dampfkesseln jeden beliebigen Brennstoff verbrennen kann, während die Sauggasanlage in erster Linie noch immer auf den teuren Koks angewiesen ist, oder wenn auch in neuerer Zeit die Verwendung von Stein- und Braunkohle möglich geworden ist, so beschränkt sich deren Verwendungsmöglichkeit doch auf die besseren Kohlensorten und auf bestimmte Stückgrößen, außerdem geht der Betrieb mit teerhaltigen Kohlenarten nicht so sicher gleichmäßig vonstatten. Anderseits hat die Dampfkraftanlage den Vorzug, kaum an Wirtschaftlichkeit einzubüßen, wenn sie schwach belastet läuft, während der Wirkungsgrad der Gasmaschinen (nicht aber der Dieselmaschinen) bei schwacher Belastung ungünstiger wird.

Demnach behaupten die beiden Maschinengattungen, Verbrennungsmaschine und Dampfkraftmaschine, nebeneinander das Feld, und es hängt von örtlichen und anderen Umständen ab, welche von beiden im Einzelfalle vorzuziehen ist. In der Nähe von Hochofenbetrieben hat die Gasmaschine unbedingt die Dampfmaschine oder Dampfturbine aus dem Felde geschlagen, weil hier gasförmiger Brennstoff zur Verfügung steht und nicht erst Gas erzeugt zu werden braucht. Für den Betrieb auf Kriegsschiffen bemüht man sich, die Ölmaschine nutzbar zu machen, weil durch Fortfallen der Kesselfeuerung zugleich der Rauch vermieden wird, der das Herannahen der Flotte weithin sichtbar werden läßt. Für Automobile oder gar Flugzeuge kommt nur die Verbrennungsmaschine in Betracht, weil es darauf ankommt, eine Maschine bestimmter Leistung außerordentlich leicht herzustellen; der Lösung dieser Aufgabe widersetzt sich die Dampfkraftanlage mit dem schwerfälligen Dampfkessel.

Die örtlichen Verhältnisse wirken gelegentlich sonderbar: man sollte meinen, daß nirgend ein so gutes Feld für die Dieselmaschine sei wie in Baku, dem Mittelpunkt der russischen Petroleumerzeugung; tatsächlich laufen in Baku kaum Dieselmaschinen: das Rohöl ist dort nämlich so billig, daß es nicht darauf ankommt, es gut auszunutzen. Man verbrennt es darum unter Dampfkesseln und läßt es Dampfmaschinen treiben, weil die Dampfkraftanlage einschließlich Kessel in der Beschaffung billiger ist als eine Dieselmaschine gleicher Leistung.

ÜBERBLICK ÜBER DIE HEUTIGEN WÄRMEKRAFT-MASCHINEN

VON K. KÖRNER

EINLEITUNG

Die folgenden Abschnitte werden von den heutigen Formen der Wärmekraftmaschinen zu handeln haben. Wir wollen uns daher in aller Kürze klarmachen, welches Gebiet diese Maschinen umfassen.

Wir unterscheiden Kraftmaschinen und Arbeitsmaschinen: Kraftmaschinen nennen wir jene, die in der Natur vorkommende Energie unmittelbar oder unter Anwendung von Zwischenmitteln in Bewegungsenergie verwandeln; die Arbeitsmaschinen hingegen dienen zur Änderung der Lage, Form und Größe fester Körper, zur Ortsänderung und Änderung der Dichte flüssiger Körper oder auch zur Erzeugung anderer Energieformen (Druckluft, Elektrizität usw.). Die meisten Arbeitsmaschinen können am einfachsten durch eine gleichförmige Drehbewegung angetrieben werden, so daß man auch die Kraftmaschinen gewöhnlich derart baut, daß sie eine nahezu gleichförmige Rotation unter Erzeugung eines Drehmoments zur Überwindung des Arbeitswiderstandes ergeben. Ist dieses Drehmoment z. B. M, so ist die in der Zeiteinheit von der Kraftmaschine geleistete Arbeit $L = M.\,\omega$ mit ω als Winkelgeschwindigkeit. Man nennt diese in Form von sogenannter kinetischer Energie oder Bewegungsenergie (freie mechanische Energie) auftretende Arbeit die effektive Leistung der Maschine in Kilogrammetern, wenn für M das gleiche Maß und für die Zeiteinheit eine Sekunde gewählt wurde; in Pferdekräften ergibt sich die Leistung dann mit $L = \frac{M\,\omega}{75}$.

Die in der Natur zur Verfügung stehende Energie hat nun sehr verschiedene Formen. Sie erscheint entweder selbst als mechanische Energie und zuweilen wieder als freie Energie (Wind, Wasserströmung) oder als eine Form der gebundenen Energie, und zwar als Energie der Lage — durch die Möglichkeit, daß eine Masse durch Heruntersinken über einen bestimmten Höhenunterschied Arbeit leistet —, oder aber als Wärmeenergie (chemische Energie der Brennstoffe u. a.). Während in jenen Fällen nur eine Umwandlung von mechanischer Energie in eine andere, unmittelbar brauchbare Form vorliegt, haben die sogenannten Wärmekraftmaschinen die Aufgabe, auch noch eine Änderung der Energieart zu leisten. Man hat es demnach dort nur mit der Mechanik zu tun, hier aber ist auch das Studium der chemischen und physikalischen Eigenschaften der verwendeten Energieträger (Brennstoffe) und etwaiger Zwischenmittel (Wasserdampf, Gas) notwendig, sowie ein Eingehen auf jenen Teil der Physik, den man Thermodynamik nennt.

Jedesmal ist die verfügbare Energie an bestimmte Massen gebunden: bei Wasserkraftmaschinen, die die Gefällsenergie von Flußläufen ausnutzen, an die Wassermenge, hier an den Brennstoff und die Luft; und ebenso gibt es stets einen Zustand dieser Massen, von dem aus eine weitere Energieentziehung nicht mehr möglich ist, der also gewissermaßen den Nullpunkt der Messung bezeichnet. Dort ist er gekennzeichnet durch den sogenannten Unterwasserspiegel bei sehr kleiner Abflußgeschwindigkeit des Wassers, bei Wärmekraftmaschinen durch die niedrigste Temperatur, die

man erzielen kann, d. i. die Temperatur der umgebenden Luft oder die des Kühlwassers, ebenfalls bei kleinster Abflußgeschwindigkeit des Energieträgers und jenem Aggregatzustand desselben, der den geringsten Wärmeinhalt erfordert.

Die Brennstoffe sind bereits im Abschnitt II a, die Eigenschaften des Wasserdampfes und der Kraftgase im Abschnitt III a vom Standpunkte der Wärmewirtschaft aus behandelt, und in letzterem Kapitel sind auch die wissenschaftlichen Grundlagen der Umwandlung von Wärme in mechanische Arbeit im wesentlichen dargelegt.

Wir haben uns demnach im folgenden nur damit zu befassen, welche konstruktiven Mittel man anwendet, um dem theoretischen Ideal möglichst nahezukommen.

Die älteste Wärmekraftmaschine ist die Dampfmaschine, die nicht unmittelbar den Brennstoff als Energieerzeuger verwendet, sondern den Wasserdampf als Zwischenmittel benutzt. Wir gehen demnach zuerst dazu über, die Erzeugung und Verbesserung des Wasserdampfes zu besprechen.

1. DAMPFKESSEL

Die Dampfkessel haben hier die Aufgabe, den für die Dampfmaschinen erforderlichen Dampf in entsprechender Qualität zu liefern; die im Brennmaterial enthaltene Wärmeenergie soll einerseits möglichst vollkommen auf den Dampf übertragen werden, d. h. der Nutzeffekt der Kesselanlage soll ein möglichst hoher sein, anderseits soll der Dampf speziell für Kraftmaschinen geeignet sein, d. h. mit gleichmäßiger, hoher Spannung und trocken oder überhitzt, also von gleichmäßiger, gegebener Temperatur gewonnen werden (vgl. Abschnitt III a).

Über die zur Anwendung kommenden Brennmaterialien ist bereits im Abschnitt I a, ferner in den Abteilungen II a und b berichtet worden. Hier sind an festen Stoffen Holz mit einem Heizwert für 1 kg von 5000 bis 4000 WE, Torf mit etwa 3000 WE, Braunkohle mit 2000 bis 5500 WE, Steinkohle mit 4000 bis 8000 WE und Koks mit 7000 WE zu nennen. Von flüssigen Brennstoffen wird Petroleum mit rund 10000 WE theoretischen Heizwertes, von gasförmigen Brennstoffen das aus den Hoch- und Koksöfen entweichende Gichtgas mit einem Wärmewert von 450 bis 700 Einheiten für 1 kg verwendet.

Die gewünschte Wärmeentwicklung geschieht durch die Verbrennung, d. i. die Verbindung mit dem Sauerstoff der Luft, die jedoch oft einen verwickelten Vorgang in sich schließt, so bei Brennstoffen, die außer Kohlenstoff noch Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff, Wasser und Schwefel enthalten, besonders dort, wo sich sogenannte schwere Kohlenwasserstoffe mit hohem Siedepunkte bilden. Zur vollkommenen Verbrennung ist hohe Temperatur im Heizraum, Zufuhr der nötigen Luftmenge und gute Vermischung derselben mit den Verbrennungsgasen notwendig. Die Verbrennung fester Brennstoffe erfolgt auf dem Rost, die erforderliche Luft dringt durch die Rostspalten und das Brennmaterial in den Feuerungsraum, unter dem Rost liegt der Aschenfall. Petroleum wird in einem Behälter durch Kesseldampf erwärmt, dünnflüssiger gemacht und dann mittels Rohrleitung der Feuerung zugeführt, wo es durch einen Dampfstrahl zerstäubt wird. Hochofengase werden den Kesseln durch Rohrleitungen zugeführt und vor dem Kessel durch ein Lockfeuer auf einem kleinen Rost unter entsprechender Luftzuführung verbrannt.

Die Dampfkessel selbst sind Gefäße aus Schmiedeeisen, die dicht gegen die Atmosphäre abgeschlossen sind und zur Aufnahme des Speisewassers und des unter Druck stehenden Dampfes dienen. Der Teil der Oberfläche, der innen von Wasser benetzt ist, wird zum größten Teil außen von den heißen Rauch- oder Verbrennungs-

gasen umspült; nur wo diese schon abgekühlt sind, dürfen sie unter entsprechenden Vorsichtsmaßregeln auf dampfberührte Flächen treffen und dienen dann zur Überhitzung des dort vorbeiströmenden Dampfes. Man hat zu beachten, daß die Kesselwand nirgend zu hohe Temperaturen annehmen darf. Feststehende Kessel werden fast stets mit Mauerwerk zum Schutz gegen Wärmeausstrahlung umgeben; dieses Mauerwerk bildet gleichzeitig die Umfassung des Feuerungsraumes und der Kanäle für die Verbrennungsgase, die dieselben in bestimmter Weise in sogenannten Zügen die Kesselwand entlangführen, bis sie durch einen regelbaren Endquerschnitt, den Fuchs, in den Schornstein gelangen, der den zur Ansaugung der Verbrennungsluft nötigen Zug herstellt.

Das zu verdampfende Wasser wird dem Dampfkessel in entsprechender Menge durch sogenannte Speisepumpen zugeführt.

Die Heizfläche des Dampfkessels, d. i. die von den Heizgasen bespülte Fläche, deren Innenseite von Wasser benetzt ist, hat die Wärme aufzunehmen und ist daher für die Leistungsfähigkeit der Anlage maßgebend. Kesselstein, Schlamm, Dampfblasen im Innern vermindern die Fähigkeit, Wärme an das Wasser abzugeben, und sind daher für die Leistung und für den Bestand des Kessels schädlich; man wirkt durch lebhafte Wasserbewegung ihrem Einfluß entgegen. Die zur Erzeugung einer gegebenen Dampfmenge in einer Stunde erforderliche Heizfläche ist je nach den Kesselsystemen verschieden, wir kommen auf die zugehörige Verhältniszahl daher bei Besprechung derselben gesondert zurück.

Für die einem gewissen Betriebe entsprechende Wahl eines Kesselsystems sind unter anderen folgende Gesichtspunkte maßgebend.

Die in einem Kessel enthaltene Wassermenge, die Größe des sogenannten Wasserraumes, spielt insofern eine wichtige Rolle, als bei plötzlich gesteigerter Dampfentnahme der Druck um so weniger sinkt, je größer diese Wassermenge ist. Wo also große Schwankungen des Betriebes vorkommen, sucht man Großwasserraumkessel zu verwenden. Dem steht aber der Umstand entgegen, daß diese Kessel großen Raumbedarf aufweisen und auch insofern ungünstig sind, als das Anheizen viel Zeit und Wärmeverlust kostet. Auch sind sie für hohe Drücke und große Einheiten kostspielig. Wo also ein gleichmäßigerer Betrieb stattfindet, oder wo eine größere Anzahl von Kesseln die Belastung des einzelnen nahe gleichzuhalten gestattet, wo ferner häufige Betriebsunterbrechungen stattfinden, werden Kessel mit kleinem Wasserraum vorgezogen. Der Dampfraum hat hauptsächlich den Zweck, den Dampf von mitgerissenen Wasserteilchen zu befreien. Bei gleicher Dampfentwicklung wird dies um so nötiger sein, je kleiner die Oberfläche des Wassers ist, an der die Dampfblasen das Wasser verlassen, je größer daher dort ihre Geschwindigkeit ist.

Die einfachste Form eines Dampfkessels ist der Walzenkessel, ein einfaches zylindrisches Gefäß mit nahezu horizontalliegender Achse und ebenen oder gewölbten Böden. Der Mantel wird aus einzelnen etwas kegelförmigen Blechringen, sogenannten Schüssen, zusammengenietet, die derart ineinandergesteckt werden, daß das Feuer nicht gegen die Endflächen stößt, weil die Nietverbindung dort sonst bald zerstört würde. Das Gefäß wird an angenieteten Pratzen aufgehängt, zur Vergrößerung des Dampfraumes wird oft ein sogenannter Dom angebracht. Die Feuerung befindet sich vorn unter dem Kessel, die Feuergase werden meist in zwei oder drei Zügen in Schlangenlinien am Mantel entlanggeführt. Der Kessel ist einfach und in der Herstellung billig, Wasser- und Dampfraum sind groß, die Wärmeausnutzung jedoch gering, die Wasserzirkulation schlecht und die Leistung im Verhältnis zur Heizfläche

klein, so daß man diese Kesselart nur für kleine Anlagen anwendet. Auch die Vereinigung mehrerer neben- und übereinanderliegender Walzenkessel durch zylindrische Rohrstutzen (Gruppenkessel, Abbildung 1) wird nur bei mäßig großen Lei-

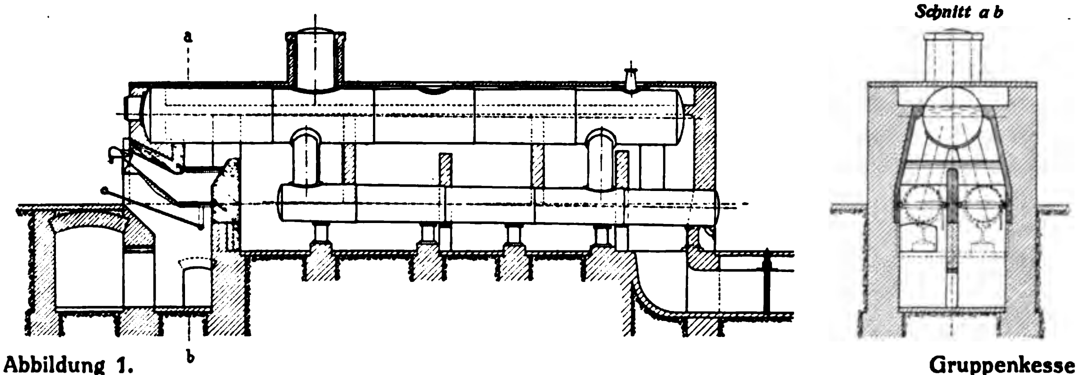


Abbildung 1. Gruppenkessel.

stungen und nur dort verwendet, wo genügend Raum vorhanden ist. Die Feuerung liegt am besten unter dem verlängerten Oberkessel, die Heizgase ziehen in Windungen abwechselnd am Ober- und Unterkessel vorbei, die Speisung geht an das hintere Ende des Oberkessels. Wärmestrahlung und Raumbedarf sind groß, die Kessel gestatten aber wegen der kleinen Durchmesser hohe Dampfdrücke und auch die Verwendung minderwertigen Brennstoffes.

Wichtiger sind die Flammrohr- oder Cornwall-Kessel. Sie bestehen ebenfalls aus zylindrischen Mänteln mit ebenen oder bombierten Böden, erhalten aber im Wasserraum zwischen diesen Böden sogenannte Flammrohre, durch die die Heizgase gehen. Die achsial gelegten Flammrohre sind glatt oder gewellt (Abbildung 2); letztere können wegen ihrer größeren Festigkeit gegen äußeren Druck im Durchmesser größer sein und lassen auch für den Fall, daß der Rost im Innern derselben angebracht wird (Innenfeuerung), eine größere Rostfläche und weiteren Feuerungsraum erreichen. Man kann mit einem Quadratmeter Heizfläche bei Cornwall-Kesseln leicht 20 kg Dampf erzeugen, das Verhältnis der Rostfläche zur Heizfläche beträgt rund 1:30. Einflammrohrkessel werden meist als Seitrohrkessel ausgeführt, die wegen erhöhter Erwärmung des Wassers auf der engeren Seite bessere Wasserströmung und auch leichtere Befahrung des Kessels ergeben (Abbildung 3). Bis etwa 2400 mm Durchmesser baut man Zweiflammrohrkessel, darüber hinaus die etwas günstiger arbeitenden Dreiflammrohrkessel, bei denen aber der verschiedenen Höhe der Feuerungen wegen gewöhnlich mechanische Rostbeschicker zur Anwendung kommen (vgl. S. 124). Die Schüsse des Kesselmantels sind zylindrisch, ihre Zahl ungerade, damit die Kesselböden gleiche Größe erhalten. Die glatten Flammrohre erhalten zur Erhöhung ihrer Festigkeit besondere Versteifungen in Form aufgebördelter Flanschen oder T-förmiger Verbindungseisen (Abbildung 4). Ihre Längsnähte werden geschweißt und meist nach unten gelegt, die Rundnähte sind der Einwirkung des Feuers möglichst zu entziehen. Die Wandstärke soll 15 mm nicht übersteigen, weil die Gefahr unganzer Stellen bei größerer Dicke wächst. Gewellte Rohre haben größere Festigkeit und bessere Längselastizität. Ungünstig ist nur der Umstand, daß die Roste komplizierter werden und die Asche aus den Vertiefungen nicht so leicht zu entfernen ist.

Das Flammrohr gibt stets den ersten Zug, dann folgen die Heizgase nach Umkehr ihrer Richtung entweder einem Unterzug und dann gleichzeitig zwei Seitenzügen oder

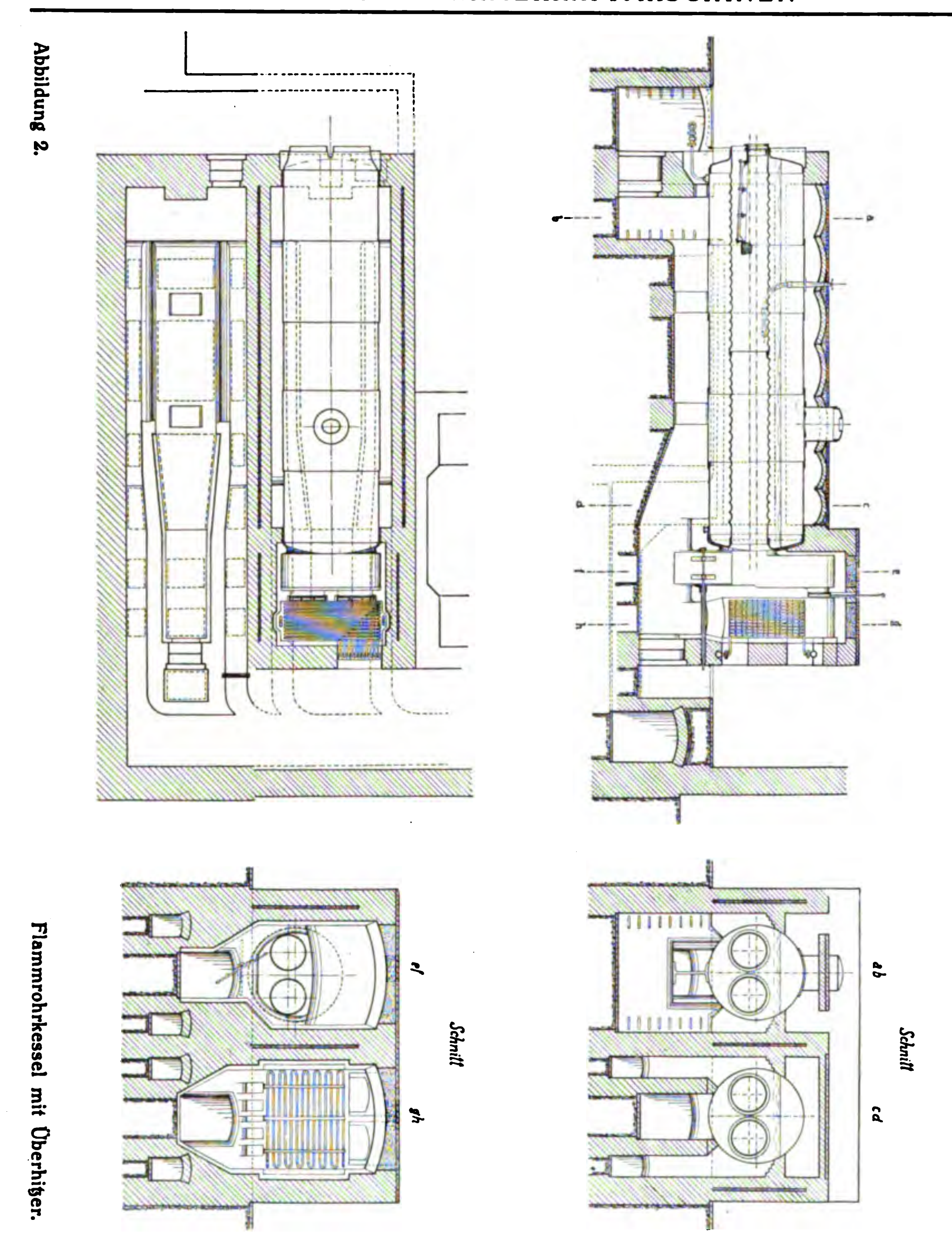


Abbildung 2. Flammrohrkessel mit Überhitzer.

nur zwei Seitenzügen an beiden Kesselseiten hintereinander; letztere Anordnung ist vorzuziehen, da sie ohne zu große Querschnitte die Seitenzüge leichter befahrbar machen läßt. Die Zuführung des Speisewassers geschieht bei Einflammrohrkesseln an

der vorderen Stirnwand nahe unter dem Wasserspiegel, bei mehreren Flammrohren meist vom oberen Mantel aus durch ein eingehängtes Krümmerrohr (Abbildung 2).

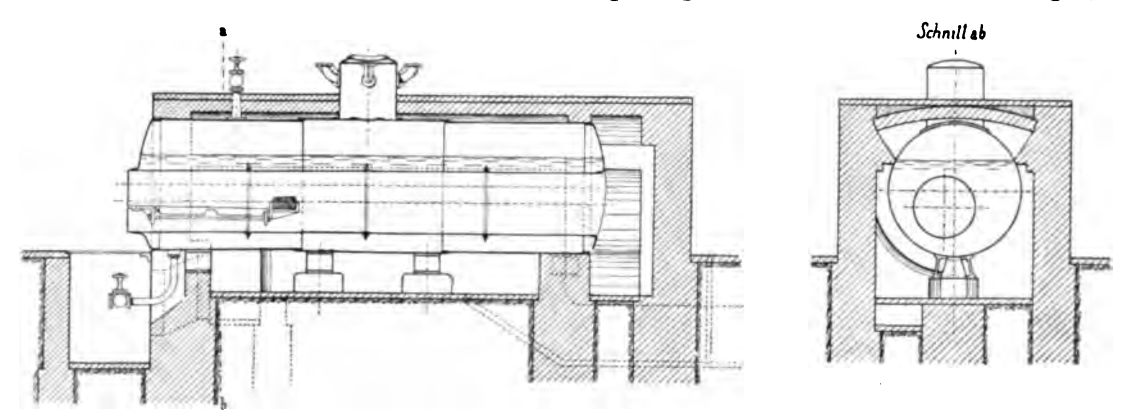


Abbildung 3. Seitrohrkessel.

Die Innenfeuerung bietet den Vorteil geringer Wärmeausstrahlung, die Heizfläche der Flammrohre ist sehr günstig, Reinigung und Wartung dieser Kessel sind einfach, Dampf- und Wasserraum reichlich. Sie werden als Seitrohrkessel und Zweiflammrohrkessel bis etwa 100 qm Heizfläche, als Dreiflammrohrkessel bis 150 qm Heizfläche verwendet.

Wendet man statt der Flammrohre eine größere Anzahl von Rohren kleineren Durchmessers an, durch die die Rauchgase ziehen, so erhält man einen Siederohrkessel. Die Feuerung befindet sich entweder unter dem Kesselmantel (Unterfeuerung, Abbildung 5) oder vor demselben (Vorfeuerung, Abbildung 24). Der Durchmesser des Mantels wird bis etwa 2 m ausgeführt, der äußere Durchmesser der Siederohre beträgt 70 bis 100 mm, ihre Länge bis rund 5 m. Die Dampflieferung für 1 qm Heizfläche kann höchstens mit 16 kg-Std. angenommen werden. Die an den Enden meist mit größerem Durchmesser versehenen Rohre werden in die sogenannten Rohrböden dicht eingewalzt, einzelne als Versteifungen eingeschraubt. Die in zwei Gruppen angeordneten Rohre lassen zwischen sich einen freien Raum zum Befahren des Kessels. Die Speisung geschieht von oben mit Einhängrohr, die Lagerung durch Tragpratzen.

Die Gase streichen zuerst unter dem Kesselmantel entlang und dann, nach Umkehr ihrer Richtung durch die Rohre, bei größeren Kesseln auch noch durch Seitenzüge. Dabei sind die Eintrittstellen der heißen Gase in die Rohre gefährlich, sie werden leicht undicht, weshalb man manchmal auch zwei Züge vor die Rohre legt. Die Mantelschüsse werden kegelförmig ausgeführt, der erste so lang, daß die Rundnaht entsprechend weit hinter der Feuerbrücke liegt. Die Zirkulation des Wassers ist mangelhaft, daher auch Schlamm- und Kesselsteinablagerung unvermeidlich; Wasserraum, Dampfraum und

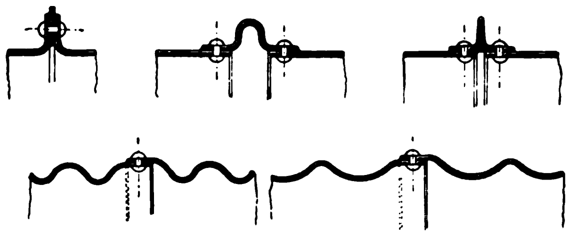


Abbildung 4. Ausführung von Flammrohren.

Wasserspiegel sind im Verhältnis zur Heizfläche klein, daher leicht schwankender Dampfdruck und feuchter Dampf. Die Reinigung im Innern ist umständlich, daher werden diese Kessel nur bei sehr gutem Speisewasser verwendet, und zwar dort, wo

es darauf ankommt, an Raum zu sparen, insbesondere bei Verwendung minderwertiger Brennstoffe bis 150 qm Heizfläche.

Aus Flammrohr- und Siederohrkesseln lassen sich nun Kombinationen bilden. So zeigt Abbildung 6 den sogenannten Lokomobilkessel, der dadurch besonders gekennzeichnet ist, daß das Flammrohr mit dem Rohrbündel gemeinsam nach vorn aus dem Mantel ausziehbar ist und so gereinigt werden kann. Man kann mit 1 qm Heizfläche normal 16 kg Dampf erzeugen, die Rostfläche ist etwa 1/40 bis 1/50 der Heizfläche, der Manteldurchmesser bis 2200 mm. Zur Trocknung des Dampfes wird meist ein Dom vorgesehen, wenn kein Überhitzer vorhanden ist. Bei Lokomobilen ist meist keine Einmauerung vorhanden, der Mantel wird nur mit Isoliermasse und einem Blechmantel versehen. Dieses System wird heute bis zu Größen von 125 qm meist für transportable Kessel verwendet. Bezüglich der hierhergehörigen Lokomotiv- und zylindrischen Schiffskessel siehe Abschnitt Va und b.

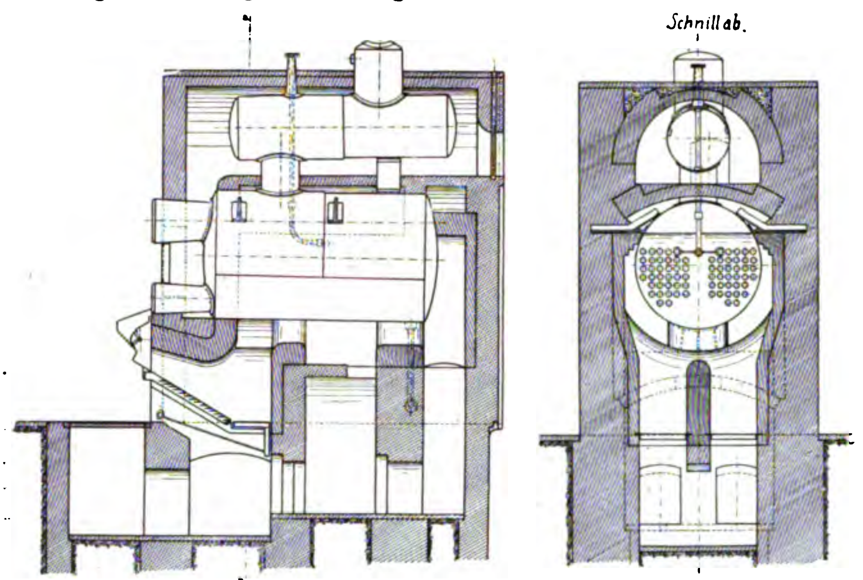
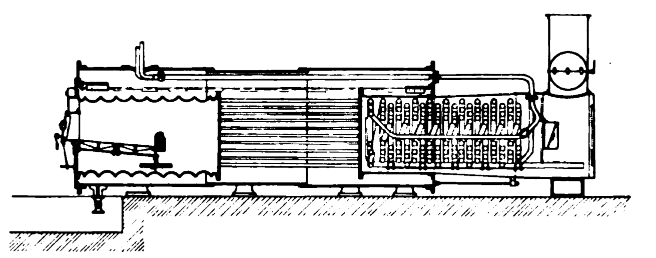


Abbildung 5. Siederohrkessel mit Unterfeuerung.

Eine weitere Kombination ist die Übereinanderlegung eines Flammrohr- und eines Heizrohrkessels, die als Tischbeinkessel (Abbildung 7) bezeichnet wird, wenn nur der Oberkessel einen Dampfraum hat, als Weinlig- oder Doppeldampfraumkessel (Abbildung 8), wenn dies auch beim Unterkessel der Fall ist. Die letzte Anordnung gibt zwar keine so gute Zirkulation, dafür jedoch wegen des größeren Dampfraumes und der größeren Verdampfungsoberfläche trockeneren Dampf und ist auch verhältnismäßig leistungsfähiger. Die Verbindung der Dampfräume erfolgt in verschiedener Weise, die Speisung für gewöhnlich im Oberkessel, von wo aus das Wasser in den Unterkessel überläuft, aber auch bei direkter Verbindung der Wasserräume im Unterkessel, wodurch die Schlammabsonderung auf diesen beschränkt wird. Die normale Belastung beträgt für ein Quadratmeter etwa 13 kg Dampf, die Rostfläche etwa 1/60 der Heizfläche. Der Zug folgt nach den Flammrohren den Heizrohren des Oberkessels, geht sodann außen längs des Oberkessels, endlich zuerst seitlich und dann unterhalb


Abbildung 6. Lokomobilkessel mit Überhitzer (Wolf).

des Unterkessels. Die Wirtschaftlichkeit ist sehr hoch, die Grundfläche gering, nur ist die Herstellung kostspielig, und der Kessel bei größerer Beanspruchung empfindlich, er verlangt auch reines Speisewasser. Von 100 bis 250 qm werden Zweiflammrohrkessel als Unterkessel verwendet, darüber hinaus Dreiflammrohrkessel.

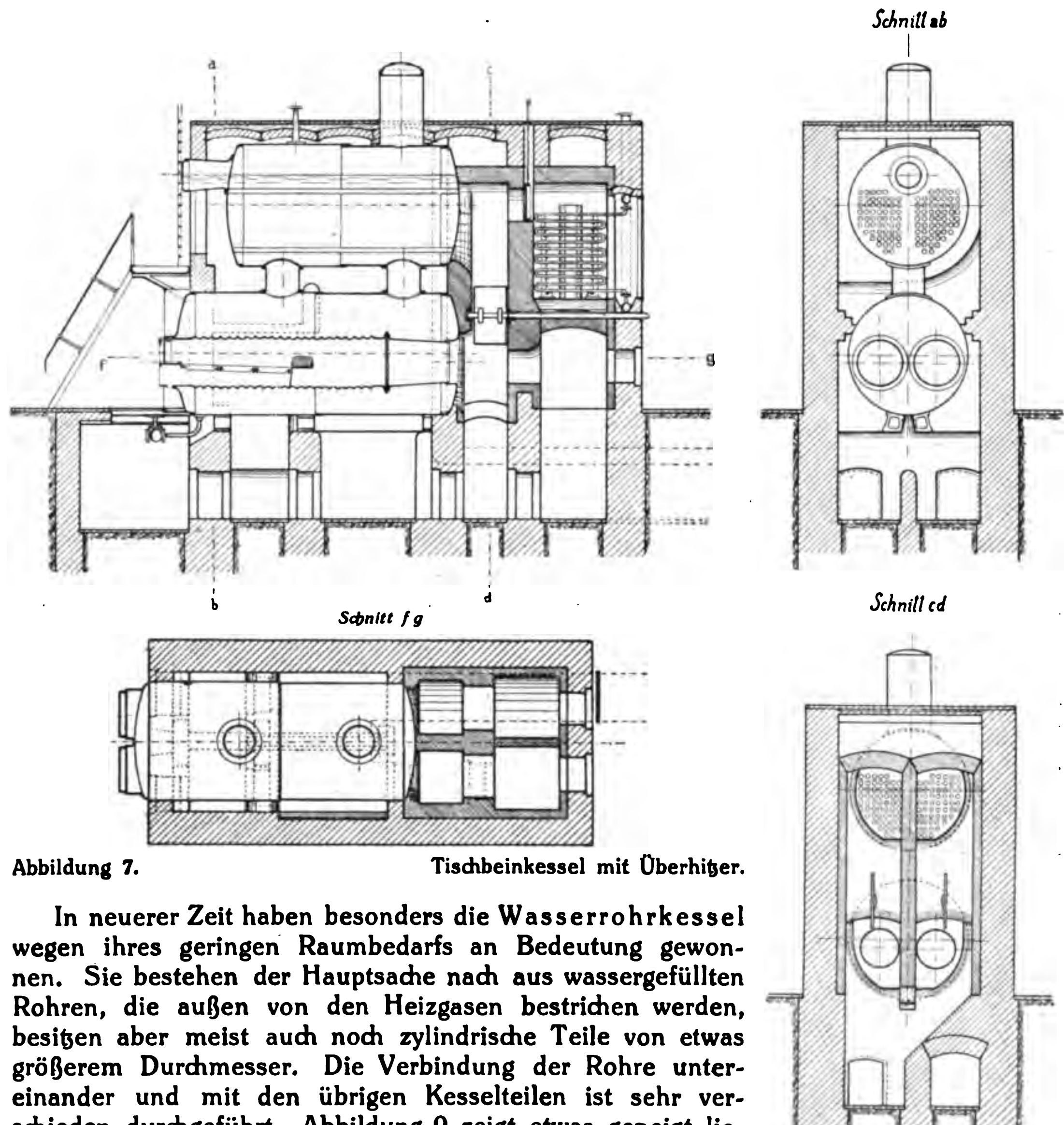


Abbildung 7. Tischbeinkessel mit Überhitzer.

In neuerer Zeit haben besonders die Wasserrohrkessel wegen ihres geringen Raumbedarfs an Bedeutung gewonnen. Sie bestehen der Hauptsache nach aus wassergefüllten Rohren, die außen von den Heizgasen bestrichen werden, besitzen aber meist auch noch zylindrische Teile von etwas größerem Durchmesser. Die Verbindung der Rohre untereinander und mit den übrigen Kesselteilen ist sehr verschieden durchgeführt. Abbildung 9 zeigt etwas geneigt liegende Wasserrohre, die vorn durch eine doppelte Wasserkammer untereinander und mit dem Oberkessel verbunden sind. In den eigentlichen Rohren liegen schwache Wasserzuführungsrohre, die mit dem vorderen Teil der Wasserkammer verbunden sind; das in dem äußeren Teil der Rohre erwärmte und verdampfte Wasser gelangt durch die hintere Kammer und ein in den Dampfraum ragendes Rohr in den Oberkessel. 1 qm Heizfläche kann normal 16 kg Wasser in

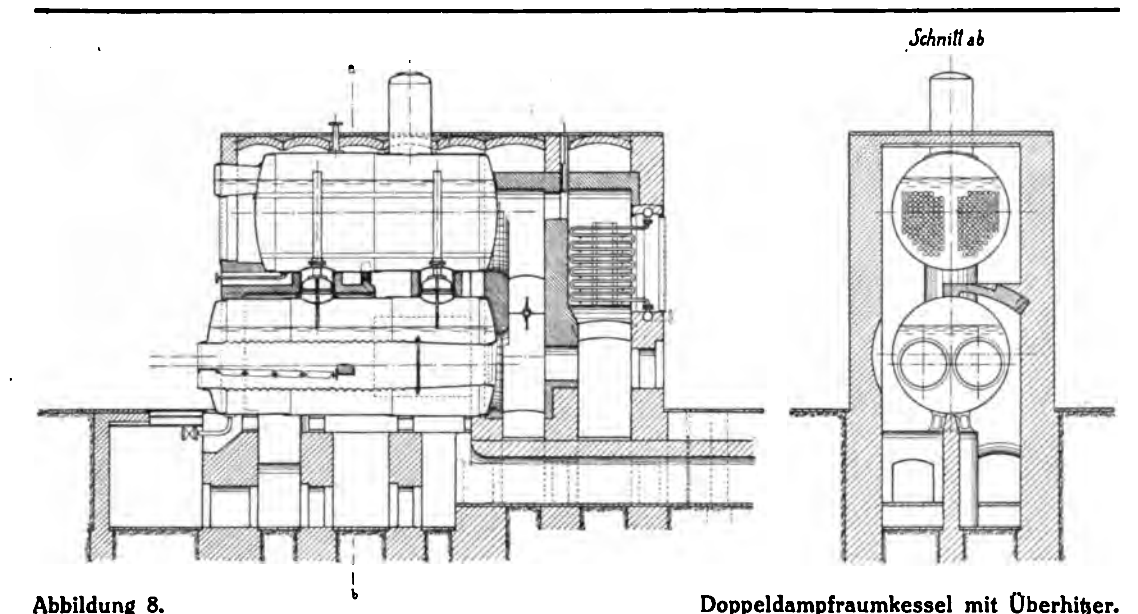


Abbildung 8. Doppeldampfraumkessel mit Überhitzer.

einer Stunde verdampfen, die Rostfläche kann verhältnismäßig groß sein, bis 1/40 der Heizfläche. Bei größeren Kesseln wendet man zwei Oberkessel an. Die äußeren Rohre sind an der Kammer durch kegelförmige Bunde abgedichtet; jedem Rohr gegenüber befindet sich in der vorderen Kammerwand eine Öffnung, die durch Innendeckel und Bügel (Abbildung 10 u. 11) verschlossen ist. Zum Herausnehmen und Einbringen dieser Deckel dienen mehrere etwas größere und elliptische Öffnungen. Die Zugführung wird entweder wie in der Abbildung dargestellt ausgeführt oder in Schlangenwindungen mit Zwischenwänden in der Rohrrichtung. Erstere Art gibt gleichmäßige Erwärmung und Verdampfung für alle Rohre, aber erfordert tiefe Lage des Rostes, damit genügend Feuerraum vorhanden ist; bei letzterer ist die Gefahr der Aschenablagerung auf den nahe horizontalen Scheidewänden größer.

Die freie Ausdehnung der Rohre ist ein Vorteil, schwierig ist aber die innere Reinigung und nachteilig die Zerstörung der inneren Rohre durch Verrosten. Gewöhnlich erhalten die Wasserrohre deshalb Verbindungskammern an beiden Enden, in deren Wände sie eingewalzt werden; diese Wasserkammern werden oben durch einen oder zwei Oberkessel miteinander verbunden. Durch die Neigung der Wasserrohre wird eine Wasserzirkulation hervorgerufen, das Gemisch von Wasser und Dampf steigt durch die vordere Wasserkammer in den Oberkessel, wo sich die Dampfblasen abscheiden, während neues Wasser durch die hintere Kammer wieder zu den Rohren strömt. Die Rohre können durch Löcher in den äußeren Wänden der Wasserkammern herausgenommen werden; bei Öffnen der betreffenden Schlußdeckel ist eine innere Reinigung ermöglicht. Die Rohre müssen auch von außen von Asche und Ruß befreit werden können, was

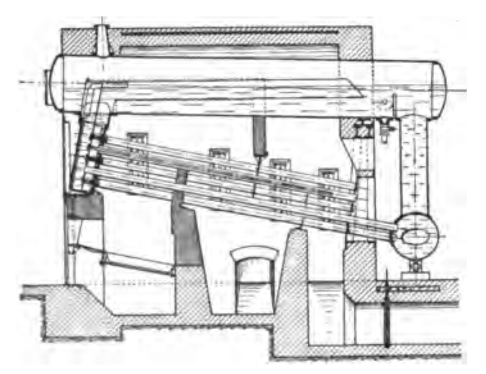
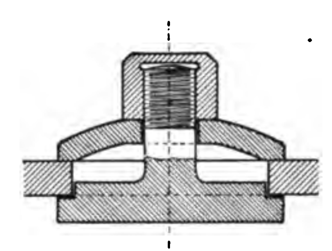


Abbildung 9. Wasserrohrkessel (Dürr).



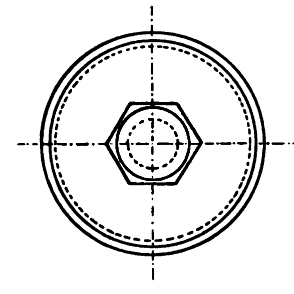
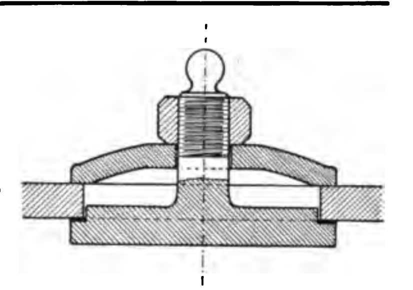


Abbildung 10. Verschlußdeckel für Wasserrohrkessel.



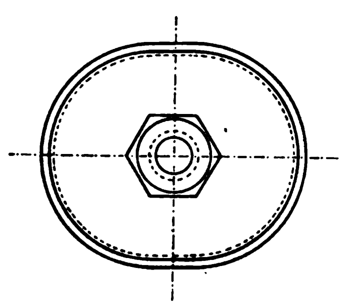
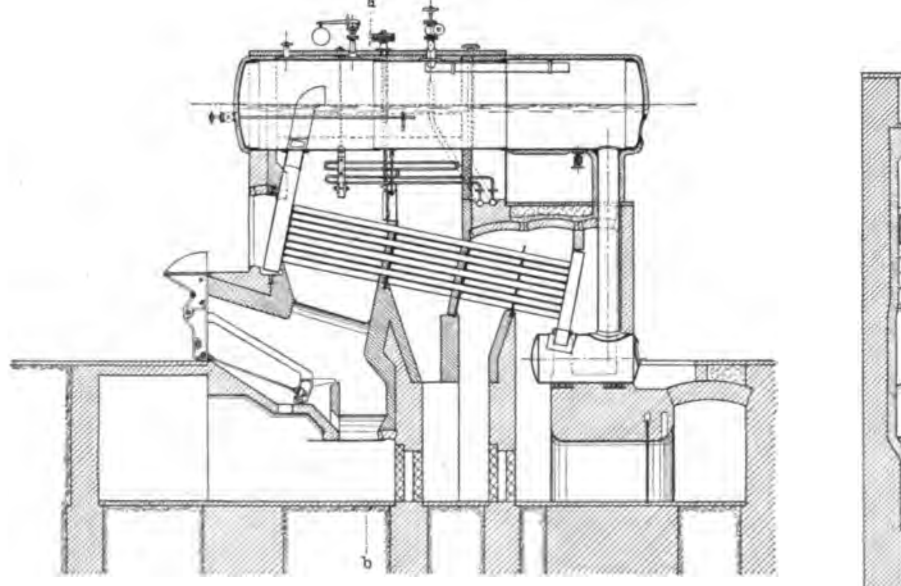


Abbildung 11. Verschlußdeckel für die Einsteckchöffnung.

meist durch einzuführende Dampfstrahlen geschieht.

Diese Kessel (Abbildung 12) verdampfen 16 kg-Std. bis 22 kg-Std. mit 1 qm Heizfläche, die Rostfläche ist etwa 1/45 der Heizfläche, die Rohrlänge beträgt selten mehr als 5 m. Die Zugführung wird wie bei dem früher beschriebenen Einkammerkessel ausgeführt.

Diese Kessel haben guten Wasserumlauf, brauchen wenig Platz und sind verhältnismäßig leicht zu reinigen. Sie werden bis zu 500 qm Heizfläche ausgeführt und ergeben bei Belastungen von normal etwa 20 kg-Std. qm rund 75 v. H. und darüber Nutzeffekt. Einzelheiten der verschiedenen Ausführungen beziehen sich auf die Erhöhung des Wasserumlaufs, auf Einrichtungen zur leichteren Absonderung der Dampfblasen im Oberkessel und zur Entwässerung des Dampfes, Verhinderung des Eintrittes von Schlamm aus dem Oberkessel in die Wasserrohre und die konstruktive Ausbildung der Rohrverschlüsse. Besonders zu erwähnen ist jedoch der Babcock-Wilcox-Kessel, bei dem die Wasserkammern in wellenförmig gestaltete einzelne Verbindungsstücke geteilt sind, um die Ausdehnungen von-



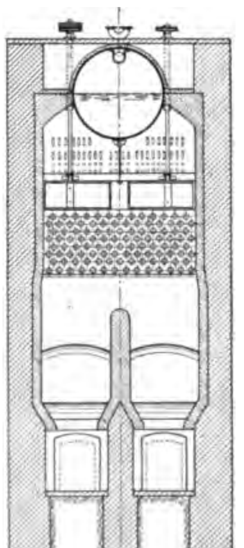


Abbildung 12. Wasserrohrkessel mit zwei Kammern und Überhitzer (Prager Maschinenbau A.-G.).

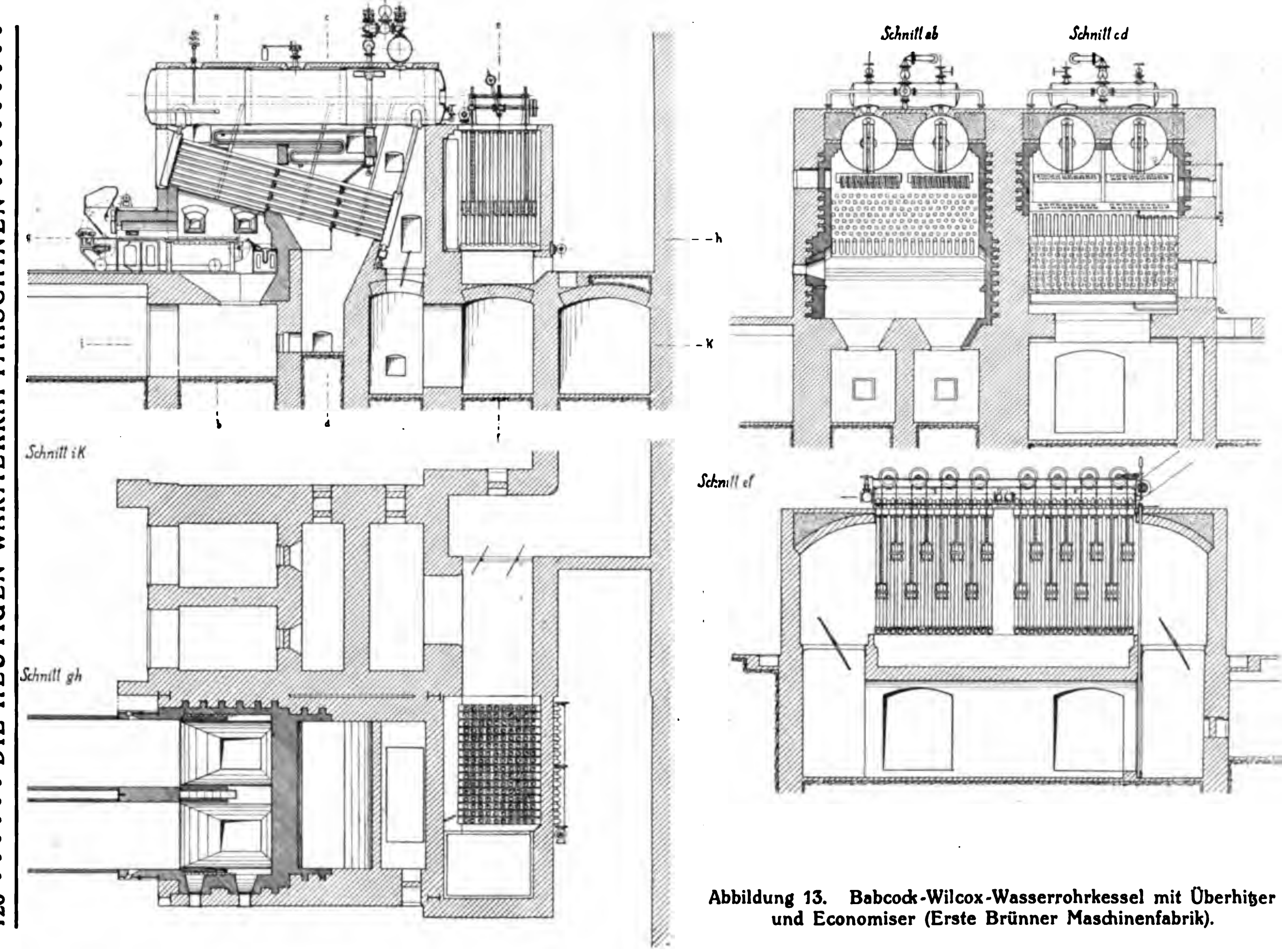


Abbildung 13. Babcock-Wilcox-Wasserrohrkessel mit Überhitzer und Economiser (Erste Brünner Maschinenfabrik).

einander unabhängiger zu machen (Abbildung 13). Wegen der Wärmedehnungen der Wasserrohre wird manchmal auch die hintere Wasserkammer nicht mit dem Oberkessel verbunden und ihr das Wasser durch die obersten Rohrreihen zugeführt.

Statt der Wasserkammern mit ebenen Rohrböden sind im Schiffbau (vgl. Abschnitt Vb) seit längerer Zeit unmittelbar die Zylinderkessel zur Verbindung der

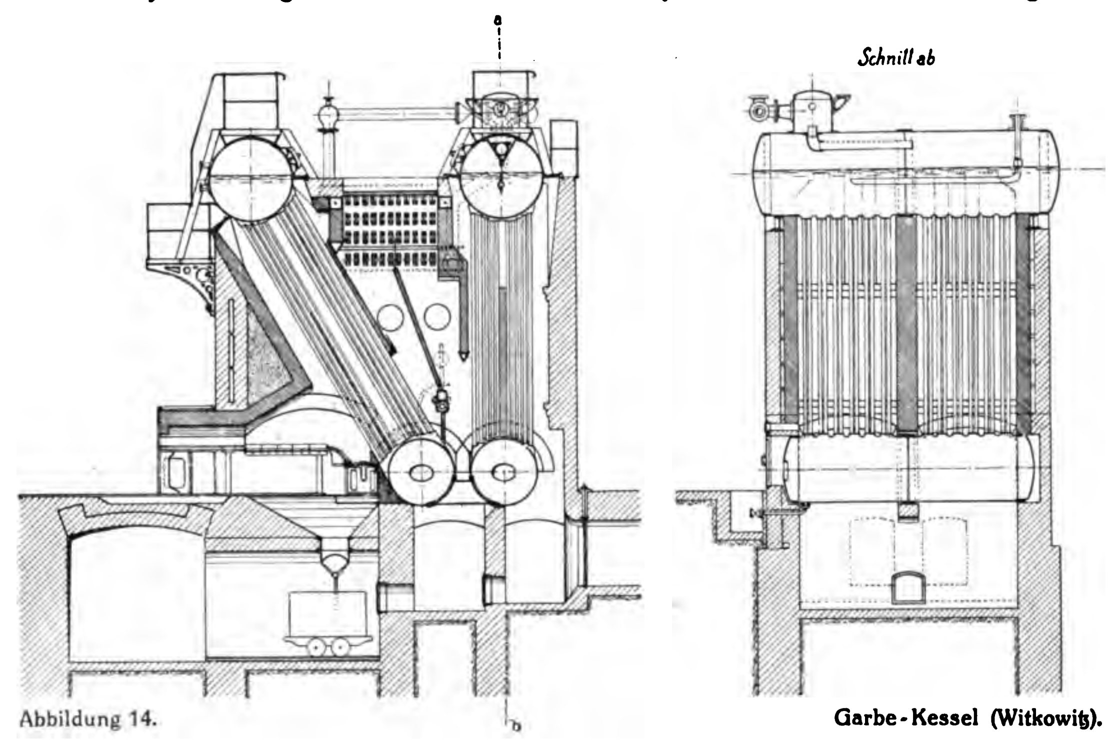


Abbildung 14. Garbe-Kessel (Witkowitz).

Wasserrohre verwendet worden. Diese Kombination wird neuerdings für gerade Rohre im Garbe-Kessel (Abbildung 14) angewendet. Während bei älteren Konstruktionen (Yarrow, Blechinden u. a.) das Einbringen und Herausnehmen der Rohre immer einige Schwierigkeiten bot, ist diese Frage hier in einfacher Weise dadurch gelöst, daß die Rohrplatten eigentümlich wellig gepreßt sind. Die steilliegenden Rohre ermöglichen guten Wasserumlauf und verhindern das Absetzen von Schlamm und Asche.

Bei ganz kleinen Betrieben, bis etwa 30 qm Heizfläche, wendet man des geringen Raumbedarfs wegen stehende Kessel an, von denen Abbildung 15 ein Beispiel gibt.

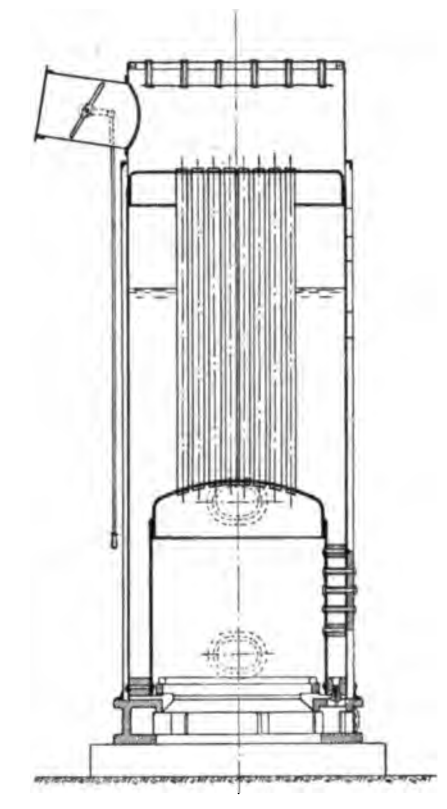
Die Dampfkessel werden fast stets aus Schweißeisen oder Flußeisen hergestellt, Kupfer wird fast nur bei den Feuerbüchsen von Lokomotiven angewendet (vgl. Abschnitt Va). Die Eigenschaften des Kesselblechs für die verschiedenen Konstruktionsteile sind gesetzlich festgelegt, Festigkeit und Dehnung müssen bestimmte Werte erreichen. Für Wasserrohre ist ein Probedruck von 30 at. vorgeschrieben.

Die Berechnung der Wandstärken geschieht der Festigkeit entsprechend.

Die Nietverbindung geschieht entweder durch Überlappung (Abbildung 16 bis 18) oder durch Doppellaschen (Abbildung 19 bis 21), und zwar jeweils ein- bis dreireihig. Auch über die Dimensionierung der Nietverbindungen bestehen gesetzliche Vorschriften.

Viele Stellen müssen besonders verstärkt werden; so haben wir von der Versteifung der Flammrohre gegen äußeren Druck bereits gesprochen. Ebene Wände

müssen stets durch Anker, Stehbolzen oder Eckbleche versteift werden, ebenso sind an den Rändern von Ausschnitten stets Verstärkungen anzubringen. Abbildung 22 zeigt z. B. einen Mannlochverschluß mit nach innen umgebördeltem Rand.



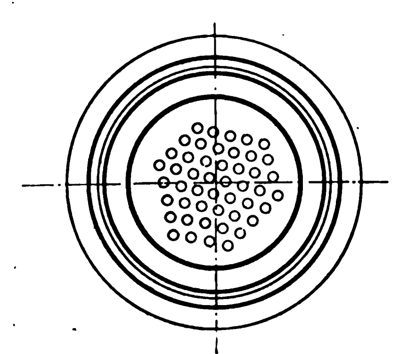


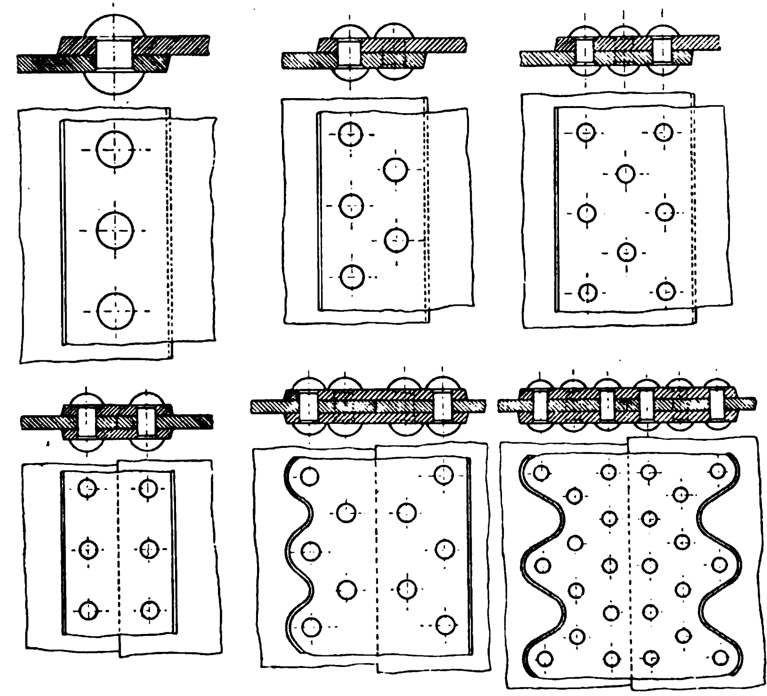
Abbildung 15. Stehender Kessel.

Der neben dem Kessel selbst wichtigste Teil einer Kesselanlage ist die Feuerung. Der Brennstoff wird auf einem Rost aufgegeben und hier unter stetiger Luftzuführung verbrannt; die Heizgase werden sodann in den Feuerzügen mit den Kesselwänden in Berührung gebracht und geben da ihren Wärmeinhalt ab, wonach sie in den Schornstein abziehen. Der Rost ist entweder ein Plan-, Treppen- oder Schrägrost, je nach den Eigenschaften des Brennmaterials. Der Planrost wird aus nebeneinandergelegten Roststäben gebildet, die zwischen sich Spielräume zum Luftdurchtritt offenlassen und mit ihrer oberen Fläche eine nahezu horizontale oder etwas nach hinten geneigte ebene Fläche bilden, deren Gesamtfläche die totale Rostfläche genannt wird, während man den Inhalt der Spalten die freie Rostfläche nennt. Die Roststäbe liegen auf der Schürplatte, den Rostträgern und hinten auf der Feuerbrücke auf (Abbildung 23).

Je nachdem der Rost vor, unter dem Kessel oder in den Flammrohren untergebracht ist, nennt man die Feuerung Vor-, Unter- oder Innenfeuerung; nur in letzterem Falle werden alle Seitenwände des Feuerraumes von Kesselblech gebildet, also Wärmeverluste nach außen vermieden. Vorfeuerung zeigt Abbildung 24, Unterfeuerung Abbildung 1, 5, 9, 12, Innenfeuerung Abbildung 2, 3, 6, 7, 8.

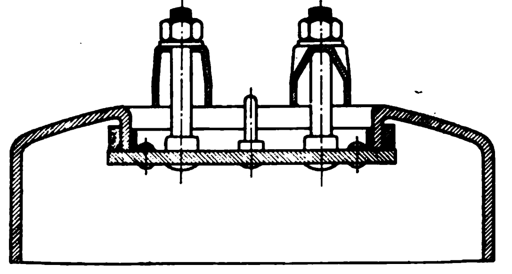
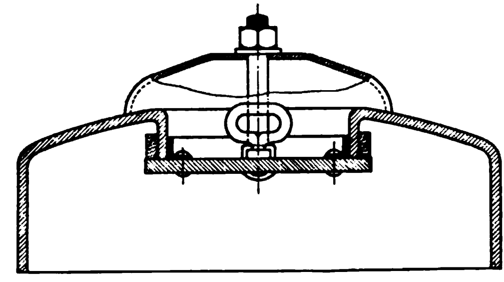
Zur Feuerungsanlage gehört das sogenannte Feuergeschränk, das aus der Feuertür und ihrem Rahmen und der Aschenfalltür besteht. Der Rahmen besteht meist aus Gußeisen und wird mit dem Mauerwerk durch Anker, mit dem Flammrohr durch Schrauben verbunden. Die Feuertür ist meist einflügelig aus Gußeisen hergestellt und mit einer Schutzplatte aus Blech oder Gußeisen versehen, die im Abstand von etwa 10 cm durch Bolzen festgehalten wird. Außerdem wird oft ein Gitterschieber zur etwa erforderlichen dauernden Luftzuführung angebracht. Die Aschenfalltür kann auch als Klappe ausgebildet sein, soll aber wie die Feuertür gut dichtend abschließen, um bei Betriebspausen die Luftzufuhr ganz abstellen zu können. Unter der Feuertür ist innen eine Schürplatte angegossen oder angeschraubt, die zur Aufnahme der ersten Roststäbe sowie zur Auflage der Schaufel und des Schüreisens dient. Die Roststäbe müssen derart gestaltet sein, daß die freie Rostfläche möglichst groß ist, ohne daß unverbrannte Kohle durch die Öffnungen fällt. Bei Schlackenbildung müssen die Öff-

nungen groß sein. Die Abkühlung der Roststäbe durch die an ihnen vorbeistreichende Verbrennungsluft muß möglichst gleichmäßig sein, sie müssen auf den Rostträgern gut gelagert sein, die den Luftzutritt möglichst wenig hindern sollen. Die Dehnung der Roststäbe darf nicht gehindert sein.


Abbildung 16—21. Nietverbindungen.

Hinter dem Verbrennungsraum befindet sich die Feuerbrücke, die bei Vor- und Unterfeuerungen ganz aus feuerfestem Mauerwerk, bei Innenfeuerung aus einer Gußeisenplatte mit darüber aufgemauerter Querwand besteht und zu verhindern hat, daß die Brennstoffe in den ersten Zug gelangen. Sie bewirkt senkrechtes Durchströmen der Luft durch die Rostspalten und innige Mischung mit den Verbrennungsgasen, soll also besonders bei Innenfeuerungen nicht zu niedrig sein. Hier wird die Gußplatte meist auch als Rostträger verwendet und unten eine Wand angegossen, die den Abschluß des Flammrohres nach vorn bildet.

Die Beschickung des Rostes beschränkt seine Größe; er soll nicht länger als etwa 2 m, nicht breiter als etwa 1,5 m sein, die Höhe über dem Fußboden des Heizerstandes soll etwa $\frac{3}{4}$ m betragen. Bei der Bedienung soll die Heiztür möglichst kurze Zeit offengehalten werden, damit dort nicht zuviel kalte Luft eintritt. Der Brennstoff soll, um möglichst gleichmäßige Verbrennung zu erzielen, in kleinen Zwischen-



Abbildung 22. Mannlochdeckel.

räumen eingeführt werden, wobei die Schichthöhe möglichst gleichmäßig zu halten ist. Der Planrost ist einfach und haltbar und gestattet die Anwendung verschiedener Steinkohlensorten und auch rasche Forcierung. Aber die Bedienung ist anstrengend und

schwierig, das häufige Öffnen der Feuertür und das Aufgeben verhältnismäßig großer Kohlenmengen auf einmal sind ungünstig. Man benutzt daher besondere Einrichtungen, um dabei den Eintritt von Luft zu verhindern; sie bestehen darin, daß man gleichzeitig mit dem Öffnen der Tür den Rauchschieber oder eine Klappe im Zug schließt.

Damit nach dem Einführen frischen Brennstoffes keine Rauchentwicklung stattfindet, wird häufig während dieser Periode vorgewärmte Luft oberhalb des Feuerraumes in einstellbarer Menge zugeführt. In Abbildung 25 ist eine solche Einrichtung dargestellt. Nach dem Schließen der Feuertür wird hier eine oberhalb derselben befindliche Klappe selbsttätig geöffnet und durch Gewicht oder Feder unter Mitwirkung eines regelbaren Ölkataraktes nach entsprechender Zeit wieder geschlossen. Die oberhalb des Feuers eintretende Oberluft mischt sich innig mit den Verbrennungsgasen, die deshalb rauchfrei verbrennen.

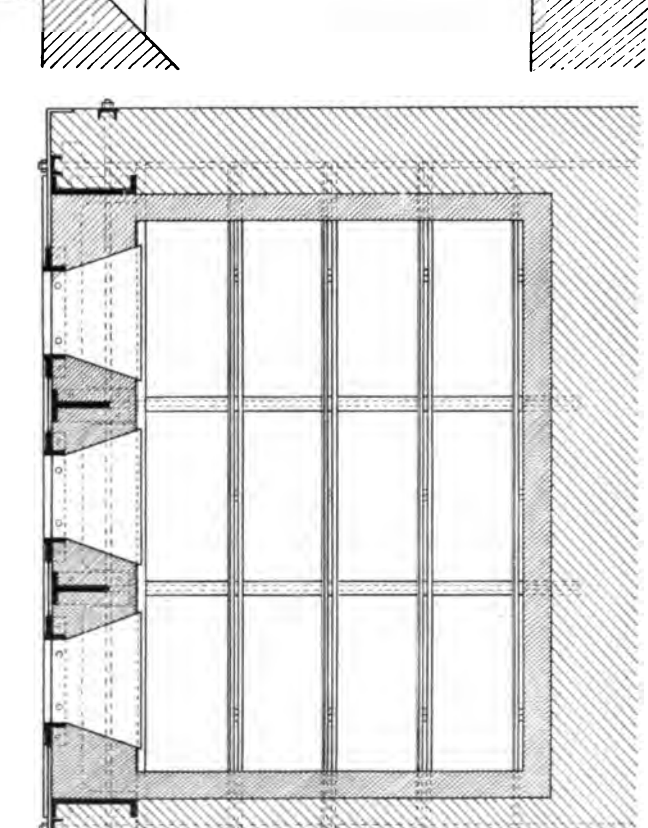


Abbildung 23. Planrost.

Von der Bedienung unabhängiger wird man durch die mechanischen Beschickungen. Dabei kommt man wegen ihrer gleichmäßigen Arbeitsweise mit geringerem Luftüberschuß aus, weshalb die Temperatur der Verbrennungsgase höher ist als bei Beschickung mit der Hand, und wodurch auch der Nutzeffekt höher wird. Dem steht nur der hohe Preis solcher Anlagen, die Unannehmlichkeit des motorischen Antriebes im Kesselhaus und die Schwierigkeit der Änderung des Anstrengungsgrades entgegen.

In allen Fällen wird die Kohle durch Trichter zugeführt, von denen aus sie durch Speise- oder Brechwalzen, durch Schieber oder auch unmittelbar abgeführt wird. Zur richtigen Beschickung ist gleichmäßige Verteilung des Brennstoffes auf der Rostfläche und Regelbarkeit der Menge desselben erforderlich. Die Verteilung wird entweder durch Wurfvorrichtungen oder durch bewegliche Roste bewirkt. Im ersteren Falle werden zur gleichmäßigen Verteilung des Brennstoffes manchmal langsam schwingende Prellbleche angewendet, gegen die die Kohle geschleudert wird, so daß sie der jeweiligen Lage des Bleches

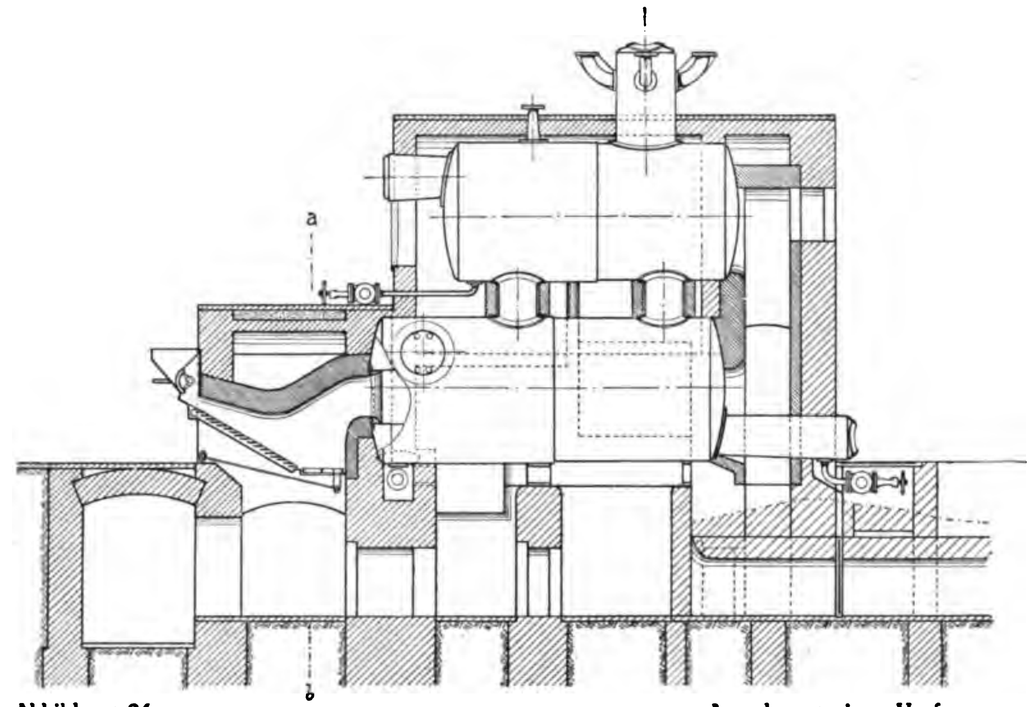


Abbildung 24. Anordnung einer Vorfeuerung.

entsprechend in verschiedenen Richtungen reflektiert wird, oder periodische Änderungen der die Wurfklappe treibenden Federspannung, so daß die Wurfweite wechselt (Abbildung 26 u. 27). In manchen Fällen wird die Regelung der Kohlenmenge durch Änderung der mittleren, zwischen den einzelnen Würfen bleibenden Zeit bewirkt, in anderen außerdem durch den Hub des Speiseschiebers.

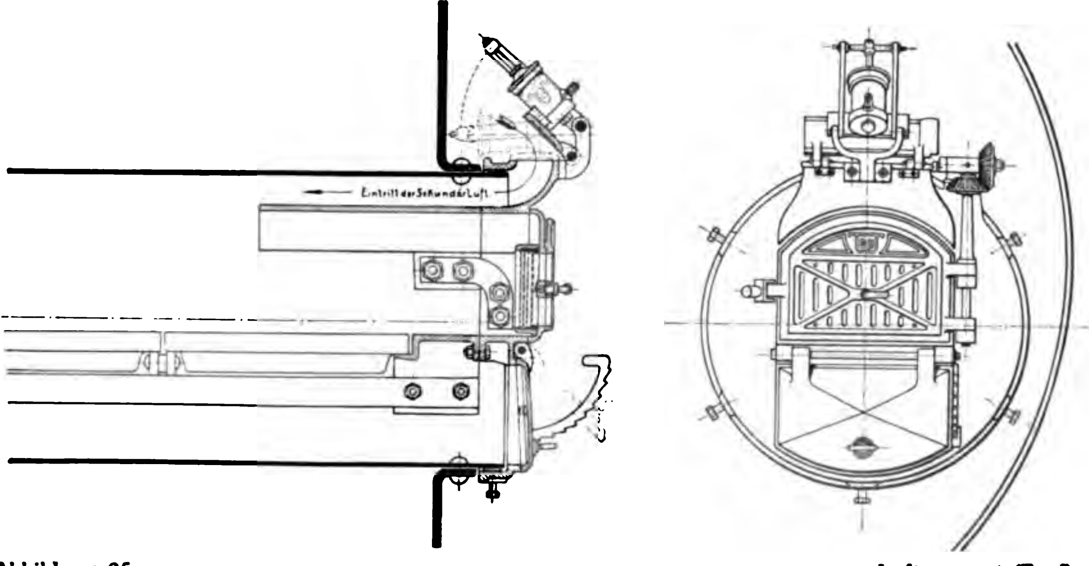


Abbildung 25. Luftautomat (Topf).

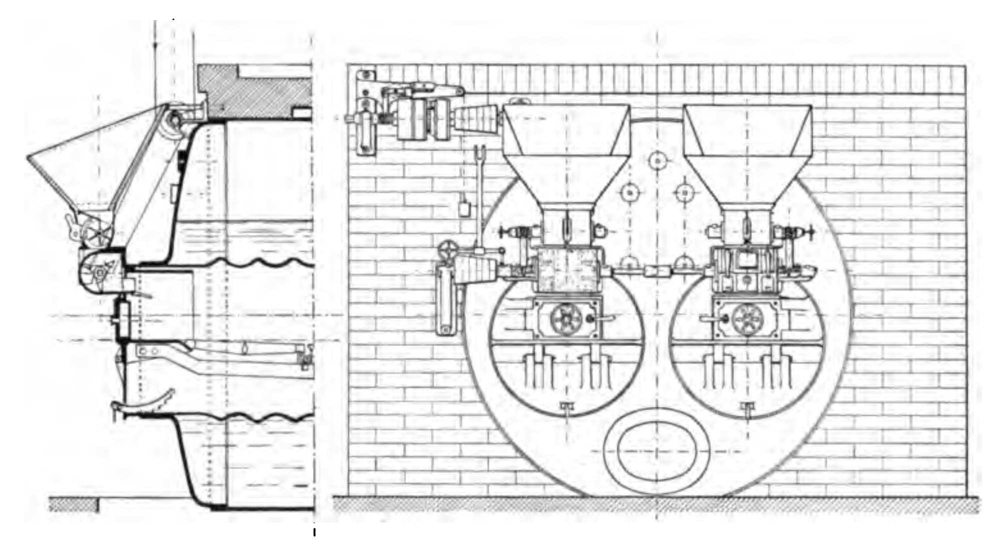


Abbildung 26. Mechanische Rostbeschickung mit Schaufelrad, Patent Zelisko (Breitfeld, Daněk & Ko.).

Als Wurfapparat dient entweder ein Schaufelrad oder eine nach dem Wurf in ihre Anfangslage zurückkehrende einzelne Schaufel. In der zwischen zwei Würfen verstreichenden Zeit wird hier durch Zurückbewegen der Wurfschaufel eine Feder ge-

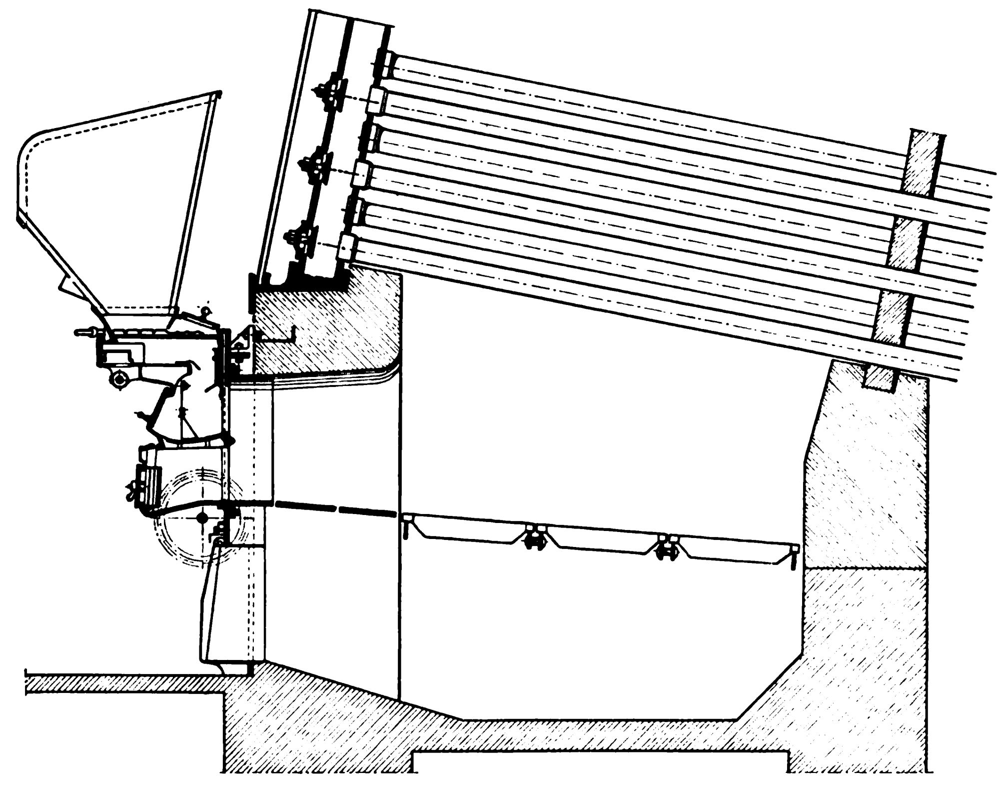


Abbildung 27. Mechanische Rostbeschickung mit schwingender Schaufel (Topf).

spannt, bis eine Knagge einfällt, und sodann durch Lösen eines Anschlages die Schaufel freigelassen, wodurch die vor ihr befindliche Kohle über den Rost gestreut wird.

Auch bei den beweglichen Rosten unterscheidet man zwei Arten. Die Roststäbe können nämlich eine horizontal hin und her gehende Bewegung ausführen und durch vorstehende Nasen die nur vorn aufgegebene Kohle brennend weiterbefördern, wobei

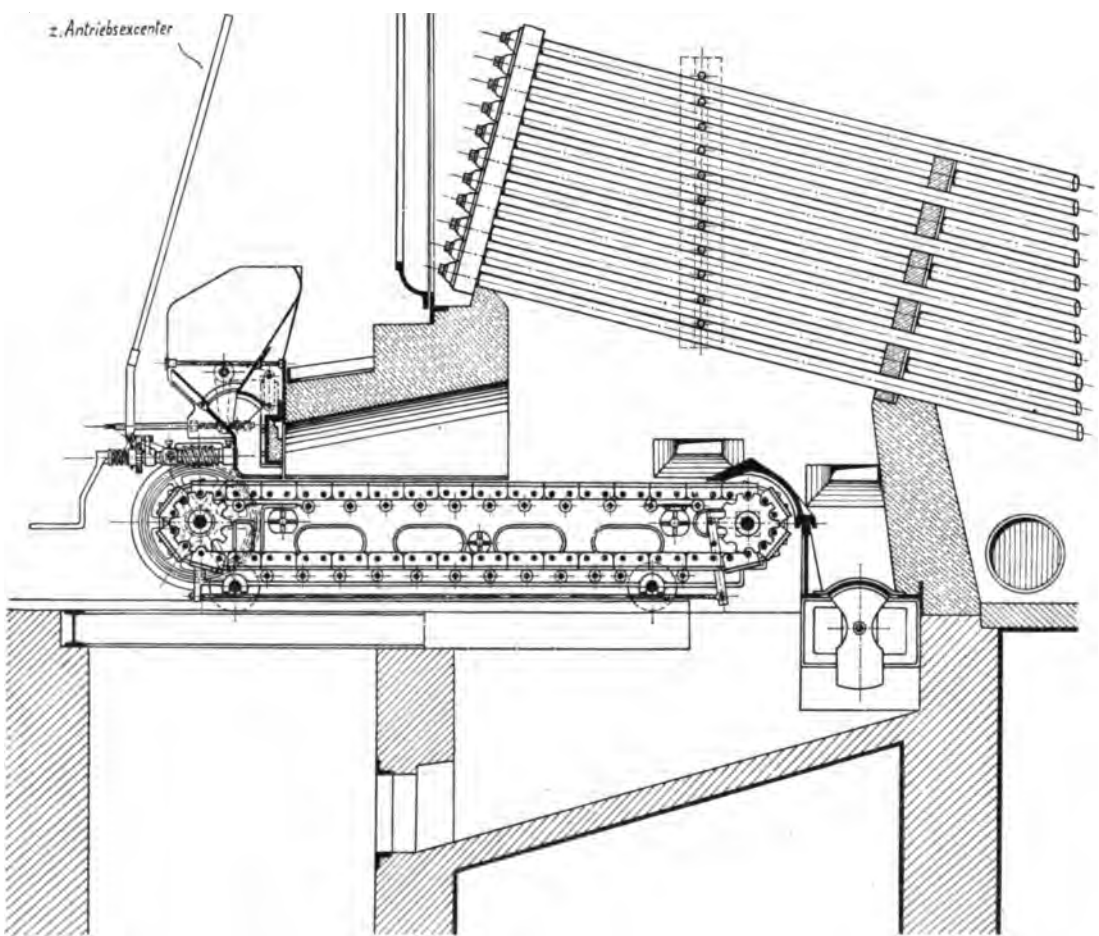


Abbildung 28. Mechanische Rostbeschickung mit Wanderrost (Erste Brünner Maschinenfabrik).

dies Zurückziehen der Roststäbe gegen die Feuertür hin nicht für alle Stäbe gleichzeitig erfolgt, oder es können die Roststäbe als Kette ohne Ende ausgeführt und gleichmäßig vorwärtsbewegt werden (Abbildung 28).

Solche selbsttätige Feuerungen bieten bei großen Anlagen außer den genannten Vorteilen noch eine beträchtliche Ersparnis bezüglich der Bedienungskosten.

Für Braunkohle und Sägespäne und überhaupt für minderwertige Brennstoffe wird oft der Treppenrost (Abbildung 29) angewendet, bei dem die Rostspalten horizontal liegen, wodurch das Durchfallen unverbrannter Teile unmöglich wird. Die Bedienung ist einfach, die Verstärkung des Feuers leicht zu erreichen, nur braucht der Rost viel Platz. Das untere Ende ist meist durch einen kurzen Planrost gebildet,

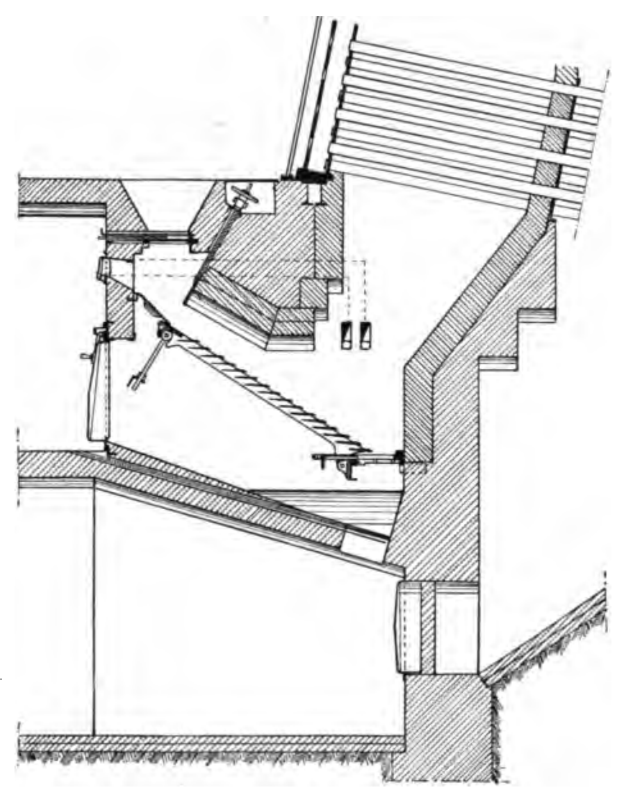


Abbildung 29. Treppenrost.

der zum Entfernen der Schlacke als Schieber ausgebildet ist und nach dem Aschenfall herausgezogen werden kann. Damit die aus dem frisch eingeführten Brennstoff entstehenden Gase gut verbrennen, werden sie durch Anordnung eines ziemlich niedrigen Gewölbes über den in hoher Glut befindlichen Brennstoff geführt.

Häufig gibt man nur den Umständen angepaßte Verhältnisziffern zwischen Brennstoffmenge und Rostfläche oder zwischen Heizfläche und Rostfläche an, die der Erfahrung entnommen sind.

Auch die Querschnitte der Heizkanäle werden nach der zu wählenden Geschwindigkeit der Heizgase bestimmt (meist 3 bis 4 m-sek), müssen aber so groß sein, daß sie zur Reinigung und Besichtigung der Kesselwände befahren werden können. Die Gestalt der Querschnitte muß derart sein, daß der Zweck der Kanäle, die Heizgase an den Kesselwänden möglichst wirksam vorbeizuführen, wirklich erreicht wird. Zur Entfernung von Flugasche sind Putzlöcher anzubringen, die meist durch gußeiserne Türen verschlossen werden. Wo es angängig ist, sind Sammelstellen für die Flugasche anzubringen.

Die Heizkanäle münden durch den Fuchs in den Schornstein. Im Fuchs befindet sich der regelbare Rauchschieber, der meist an einem zum Heizerstand führenden Drahtseil aufgehängt ist. Zur Berechnung des kleinsten Schornsteinquerschnitts genügt die Annahme einer Geschwindigkeit der in demselben strömenden Gase mit $2\frac{1}{2}$ bis $3\frac{1}{2}$ m-sek und die Angabe des von 1 kg Brennstoff entwickelten Gasvolumens, bezogen auf 0^0 Temperatur (etwa 16 cbm). Die Höhe des Schornsteins nimmt man etwa 20 bis 30 mal so groß als den oberen lichten Durchmesser, den kleineren Wert benutzt man natürlich für die größeren Querschnitte.

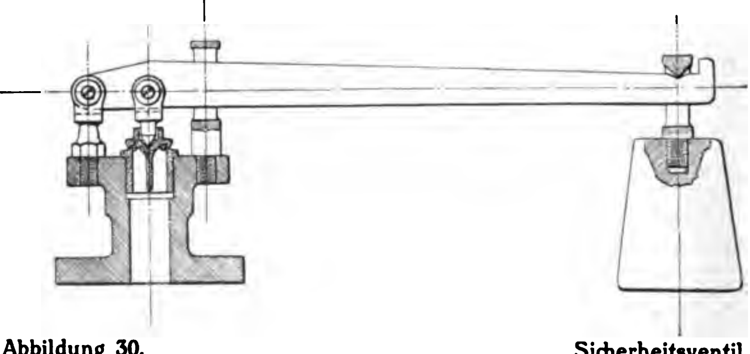


Abbildung 30. Sicherheitsventil.

Bei der Kesseleinmauerung ist außer der Einhaltung entsprechender Querschnitte in den Zügen darauf zu achten, daß die von sehr heißen Gasen getroffenen Wände

mit Schamottesteinen belegt werden müssen. Wo eine Berührung der Kesselwände mit dem Mauerwerk stattfindet, muß Lehm, Schamotte oder Zement verwendet werden, da Kalkmörtel starkes Rosten verursacht. Das Mauerwerk wird durch Anker besonders an den heißen Stellen zusammengehalten, die Außenwände werden manchmal auch als Gewölbe an vertikalen, quer verankerten Profileisen ausgeführt (vgl. Abbildung 42).

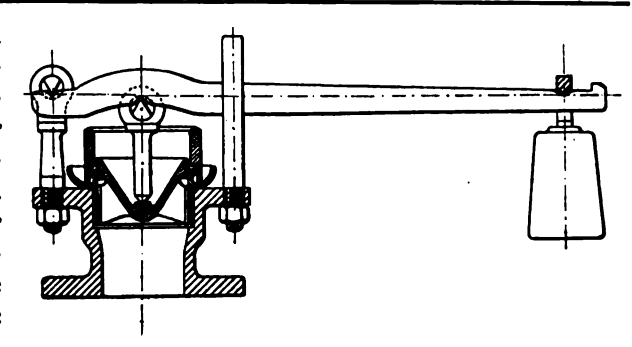


Abbildung 31. Hochhubsicherheitsventil.

Die sogenannte Armatur der Kessel besteht aus der groben und der feinen Armatur. Erstere besteht aus dem Rost, dem Feuergeschränk, Heiztüren, Rauchschieber, Aufhängevorrichtungen oder Kesselstühlen u. a. Zur feineren Armatur hingegen gehören das Sicherheitsventil, Dampfabsperrventile, Speise- und Ablaßventil, Wasserstandzeiger und Manometer.

Das Sicherheitsventil (Abbildung 30) wirkt dadurch, daß ein durch Gewicht oder Feder belastetes Tellerventil bei einem bestimmten Druck geöffnet wird und Dampf ausströmen läßt, und zwar entweder unmittelbar ins Freie oder durch eine Rohrleitung. Diese einfachen Ventile wirken im wesentlichen nur als Signalapparate, geben aber keine unbedingte Gewähr gegen Überschreitung des Druckes im Kessel. Man hat daher sogenannte Hochhub-Sicherheitsventile konstruiert, wo bei einem über den vorgeschriebenen steigenden Druck durch die Wirkung einer Kolbenplatte oder durch die Kraft des austretenden Dampfstrahls der Hub des Ventils vergrößert wird (Abbild. 31).

Das Dampfabsperrventil hat den Zweck, die Dampfleitung vom Kesselraum zu trennen (Abbildung 32). Die Größe wird durch die durchströmende größte Dampfmenge bestimmt. Ein ähnliches Absperrventil wird gegen die Speiseleitung hin angebracht, vor diesem aber das als Rückschlagventil gebaute Speiseventil, das sich selbsttätig öffnet und schließt (Abbildung 33).

Wasserstandzeiger sind entweder Probierventile, die beim Öffnen entweder Wasser oder Dampf entweichen lassen, oder Wasserstandgläser, an denen man unmittelbar den Wasserstand ablesen kann. Die Enden der vertikalen Rohre werden mit dem Wasser- bzw. Dampfraum unter Zwischenschaltung kleiner Hähne oder Ventile verbunden, unten wird noch ein Ablaßhahn angeordnet. Die Gläser sind entweder zylindrisch oder flach und sind im letzten Falle immer in Metallgehäusen untergebracht. Damit bei etwaigem Zerspringen des Glases durch einseitige Abkühlung oder Abnutzung die Splitter nicht Schaden stiften, wird dasselbe meist durch ein

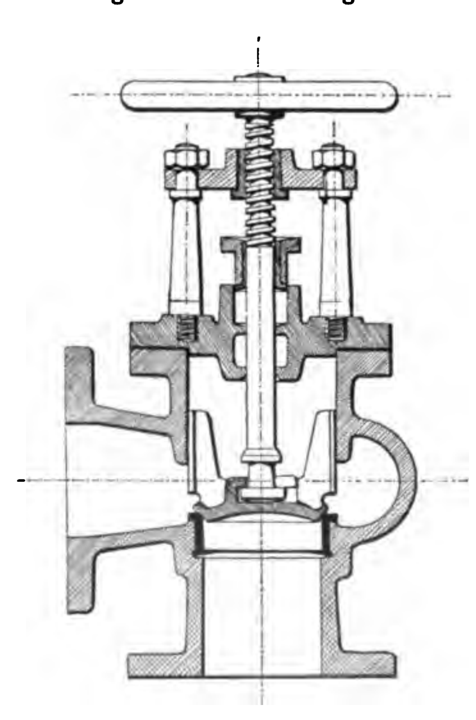
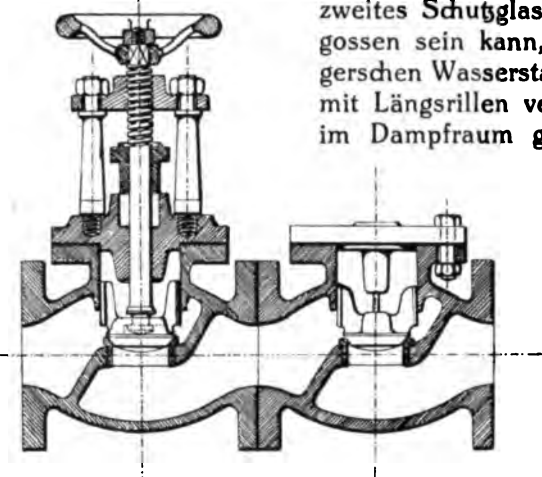


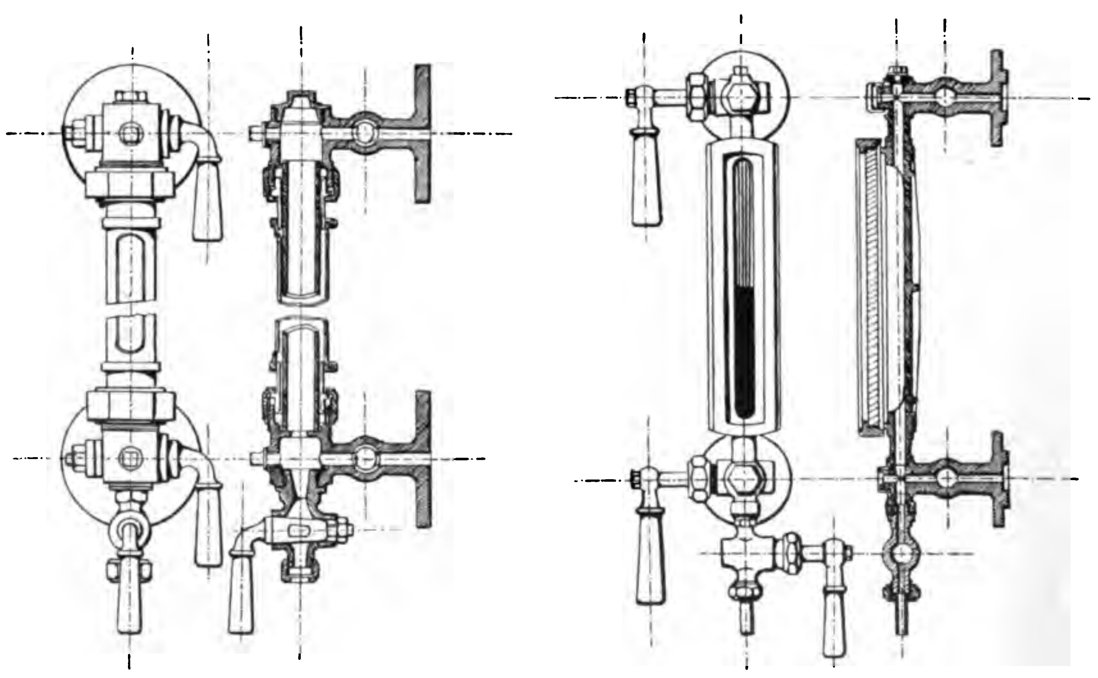
Abbildung 32. Dampfabsperrventil.


Abbildung 33. Speiseventil.

zweites Schutzglas, in das auch ein Drahtgeflecht eingegossen sein kann, umgeben (Abbildung 34). Beim Klingerschen Wasserstandzeiger (Abbildung 35) werden flache, mit Längsrillen versehene starke Gläser angewendet, die im Dampfraum glänzend weiß, im Wasserraum dunkel erscheinen, wodurch die Kontrolle wesentlich erleichtert wird. Es sind zwei getrennte Wasserstandanzeiger gesetzlich vorgeschrieben. Abbildung 36 zeigt ein Rohrbruchventil der Firma Teudloff & Dittrich in Wien, das durch die zu rasche Dampfströmung selbsttätig schließt.

Als Druckmesser werden zumeist Federmanometer angewendet, und zwar entweder solche mit wellenförmigen Plattenfedern oder Rohrfedern. Vor jedem Manometer bringt man einen Dreiwegehahn an, um den Druck abzunehmen. Hier wird gewöhnlich auch der vorgeschriebene Flansch für die Anbringung eines Kontroll-Manometers angeordnet.

Die Speisung der Kessel mit Wasser geschieht durch Speisepumpen, die entweder gesondert oder von der Dampfmaschine aus unmittelbar angetrieben werden, oder auch durch Dampfstrahlpumpen (Abbildung 37). Der Frischdampf wirkt hier beim Durchströmen einer Düse durch seine Geschwindigkeit saugend, und das angesaugte Wasser kondensiert den sich darin mischenden Dampf, wodurch der Druck noch ver-


Abbildung 34. Wasserstandzeiger. Abbildung 35. Klingerscher Wasserstandzeiger.

mindert wird. In einer Fangdüse wird durch Erweiterung die Geschwindigkeit verringert und der Druck entsprechend erhöht. Hier wird das Speisewasser durch den beigemengten Dampf gleichzeitig vorgewärmt, was für den Dampfkesselbetrieb von Vorteil ist, da weniger Temperaturunterschiede auftreten. Wo aber Pumpen verwendet werden, ist eine besondere Vorrichtung zum Vorwärmen des Speisewassers erforderlich und um so vorteilhafter, als man gewöhnlich sonst verlorengehende oder nur unvollkommen ausgenutzte Wärme hierzu verwenden kann. Zur Erwärmung können entweder Abgase aus den Feuerzügen des Kessels verwendet werden, wie beim sogenannten Greenschen Economiser (s. Abbildung 13), oder Mitteldruck- oder Abdampf einer Dampfmaschine (Abbildung 38). Der Economiser besteht aus vertikalen gußeisernen Rohren, durch die von unten her das Speisewasser strömt, und die in einer Erweiterung des Fuchses untergebracht sind. Zur äußeren Reinigung dienen selbsttätig hin und her gehende Kratzer, das Innere der Rohre kann von oben her gereinigt werden. In neuerer Zeit wendet man für Speisewasser von höherer Temperatur auch schmiedeeiserne Economiser an, die den Überhitzern ähnlich gebaut sind. Die Abdampfvorwärmer bestehen meist aus Rohren, die von Dampf durchströmt werden und außen von Speisewasser umgeben sind.

Abbildung 36. Rohrbruchventil (Teudloff & Dittrich).

Besonders wichtig sind die Überhitzer, die den Zweck haben, den für die Ausnutzung in der Dampfmaschine weit vorteilhafteren überhitzten Dampf zu erzeugen. Die Überhitzung wird dadurch hergestellt, daß der aus dem Dampfkessel entnommene Dampf in Rohren an weiteren Heizflächen vorbeistreicht und dort nach Verdampfung der noch etwa vorhandenen Wasserbläschen eine höhere Temperatur annimmt, als der Sättigungstemperatur bei dem vorhandenen Druck entspricht. Die Heizung der Rohre kann entweder durch eine besondere Feuerung ge-

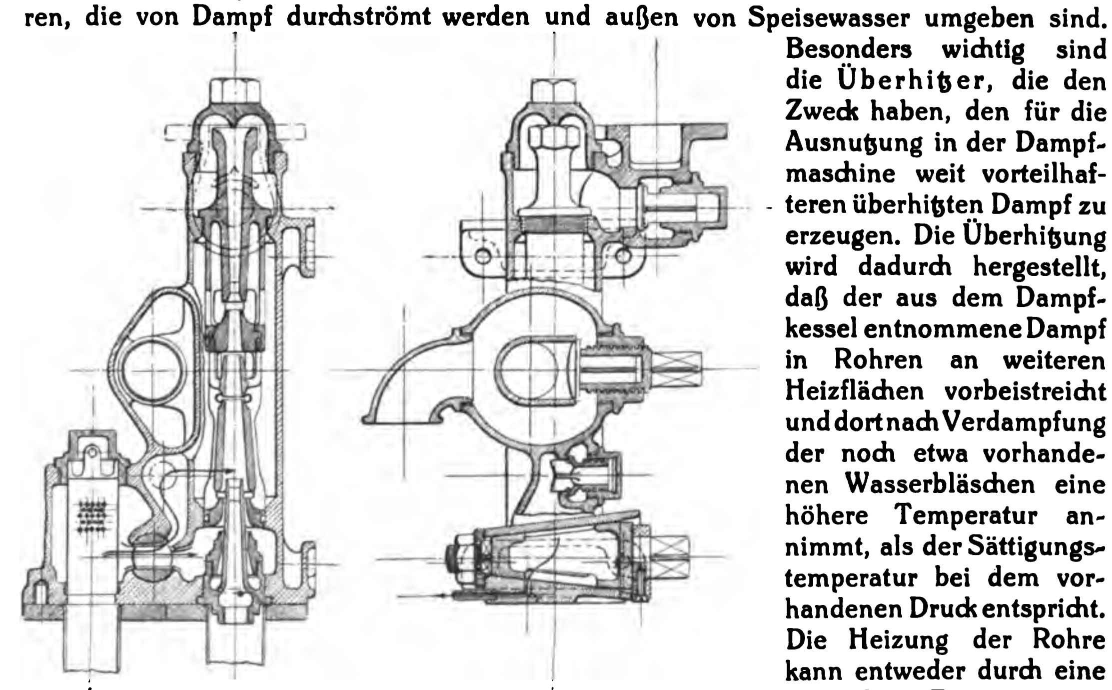
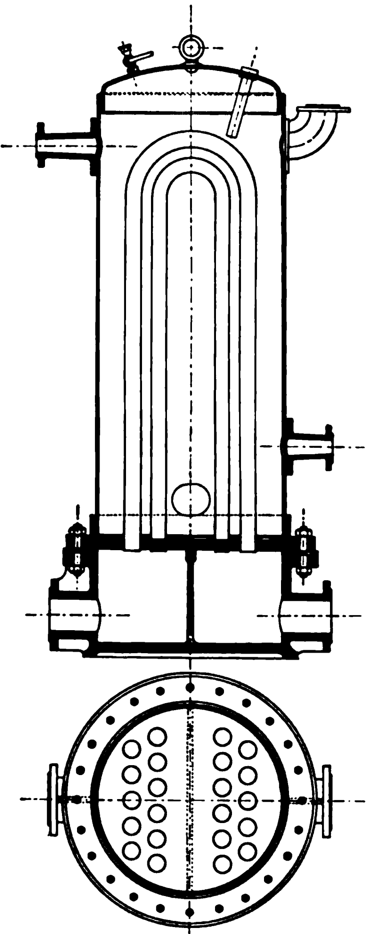


Abbildung 37. Injektor.

9*

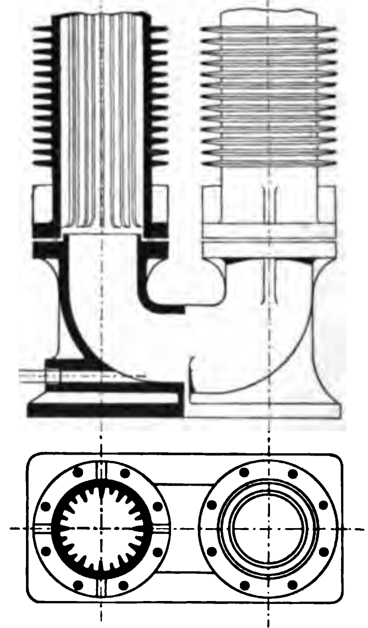

Abbildung 38. Röhrenvorwärmer.

schehen oder dadurch, daß man die Überhitzerrohre in einen Rauchzug des Kessels legt. Ersteres wird nur als Ergänzung einer bereits bestehenden Kesselanlage verwendet. Die Anordnung des Überhitzers im Kesselzug kann in verschiedener Weise geschehen, wie die Abbildungen 1 bis 14 bereits dargestellt haben. Gewöhnlich geschieht dies derart, daß eine seitliche Abzweigung des Heizkanals erweitert wird und den Überhitzer aufnimmt. Die beiden Äste können dann wieder zu einem Heizkanal oder erst im Fuchs miteinander vereinigt werden. Dabei ist durch Rauchschieber oder Klappe eine Regelung der Heizgasmenge für den Überhitzer möglich (Abbildung 7, 8, 11).

Die Überhitzerrohre werden entweder aus Gußeisen, und zwar als Rippenguß (Abbildung 39), oder aus Schmiedeeisen hergestellt. Hier benutzt man naturgemäß möglichst enge Rohre, die wegen des für den Dampf nötigen Querschnitts parallel geschaltet werden müssen. Dies wird durch Dampfkammern oder Verteilungsrohre bewirkt, an denen die Überhitzerrohre entweder durch Flanschen, Einschrauben oder Aufwalzen befestigt werden. Bei geraden Rohren braucht man zwei solcher Kammern, deshalb benutzt man meist U-förmig gebogene oder Schlangenrohre. Die Kammern werden aus Schmiedeeisen genietet, geschweißt oder aus Gußeisen hergestellt und entweder im Heizraum, im Mauerwerk oder außen angebracht.

An Armaturen erhält ein Überhitzer Dampfabsperrventile an beiden Enden und ein Umlaufdampfventil, ein Sicherheitsventil, ein Dampfthermometer, eine Entwässerungsvorrichtung und einen Reinigungsapparat, der gewöhnlich in einem einzuführenden Luft- oder Dampfstrahl zum Ablassen von Ruß und Asche besteht.

Beim Verdampfen im Kessel sind vielfach Schlamm- und Kesselsteinbildung und damit schlechte Wärmeleitung der Kesselwände, Wärmeverluste und zu hohe Temperaturen des Bleches an den betreffenden Stellen zu fürchten. Damit diese Einflüsse nicht allzusehr ins Gewicht fallen und auch nicht zu Zerstörungen Veranlassung geben, müssen die Kessel in diesen Fällen häufig gereinigt werden, was Mühe und Kosten verursacht. Deshalb ist dann oft eine Reinigung des Speisewassers vor dem Speisen oder im Kessel selbst erforderlich. Erstere kann mechanisch durch Klärbassins geschehen, wenn das spezifische Gewicht der Beimengungen merklich größer


Abbild. 39. Schwoerer-Überhitzer.

als das des Wassers ist, oder im entgegengesetzten Falle durch Kies- oder Koksfilter. Auch das sonst reine Kondenswasser aus den Mänteln und Aufnehmern der Dampfmaschinen bedarf oft einer Reinigung von beigemengtem Schmieröl. Hier werden Filter mit Holzwolle oder Badeschwamm verwendet, zumeist sucht man aber das Öl schon aus dem Dampf unmittelbar abzuscheiden, insbesondere wo Oberflächenkondensation verwendet wird.

Außer den mechanischen Verunreinigungen sind es noch Säuren und Salze, insbesondere von Kalk und Magnesia, deren Ausscheidungen beim Verdampfen den Kesselstein bilden. Zur Reinigung sucht man die gelösten Salze in unlösliche zu verwandeln und diese dann durch Filtration zu entfernen. Hierzu verwendet man gebrannten Kalk (Kalkwasser, Kalkmilch) und Soda oder Ätznatron. Abbildung 40 zeigt einen Kesselreinigungsapparat Patent Dervaux. Das zu reinigende Wasser fließt in die Abteilung a des Behälters b, während in der Abteilung c Kalkmilch und in d Sodalösung erzeugt wird. Das Wasser fließt durch einen Hahn und ein Rohr direkt in eine Mischrinne e, während die Kalkmilch, mit Wasser aus a neuerlich gemischt, von unten her in den Sättiger f strömt, hier bei immer kleiner werdender Geschwindigkeit aufsteigt und endlich als klares Kalkwasser in die Rinne e gelangt. Die Sodalösung wird in den kleinen Behälter g geführt, dessen Niveau durch einen Schwimmer festgehalten wird, und gelangt durch einen vom Schwimmer h im Behälter a geregelten Syphon ebenfalls in die Rinne e. Von hier aus kommt das Gemisch in

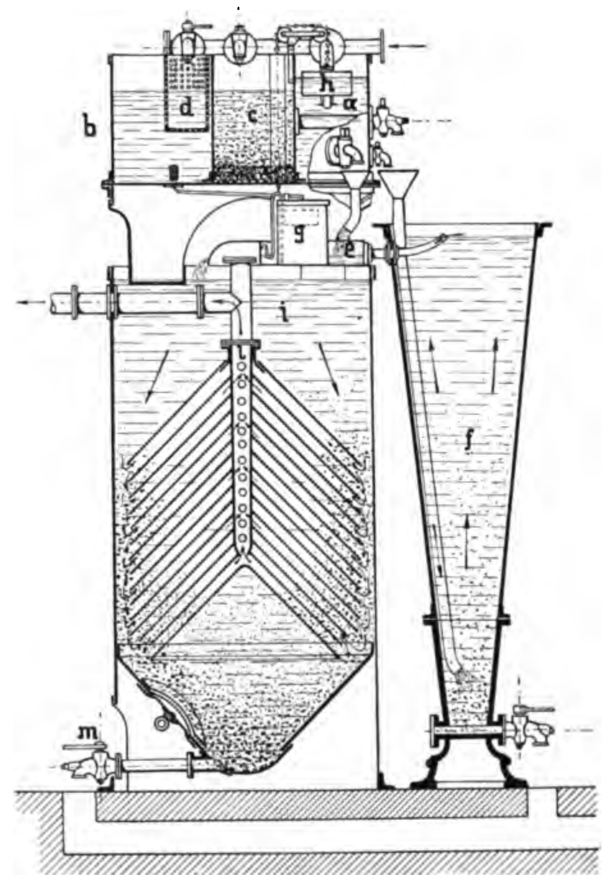


Abbildung 40. Dervaux-Wasserreiniger.

Abbildung 41. Anordnung eines Kesselhauses (Längenschnitt).

den Klärbehälter i, wo das Wasser, zwischen den kegelförmigen Wänden aufsteigend, den gebildeten Schlamm absetzt und gereinigt durch das zentrale Rohr l abfließt. Der Schlamm wird zeitweilig durch den Hahn m abgelassen. Bei Verminderung der zu reinigenden Wassermenge sinkt der Wasserspiegel in a, Wasser- und Kalkmilchzufluß zur Rinne e werden von selbst kleiner, und der sinkende Schwimmer h vermindert auch durch Heben des Syphons den Sodazufluß.

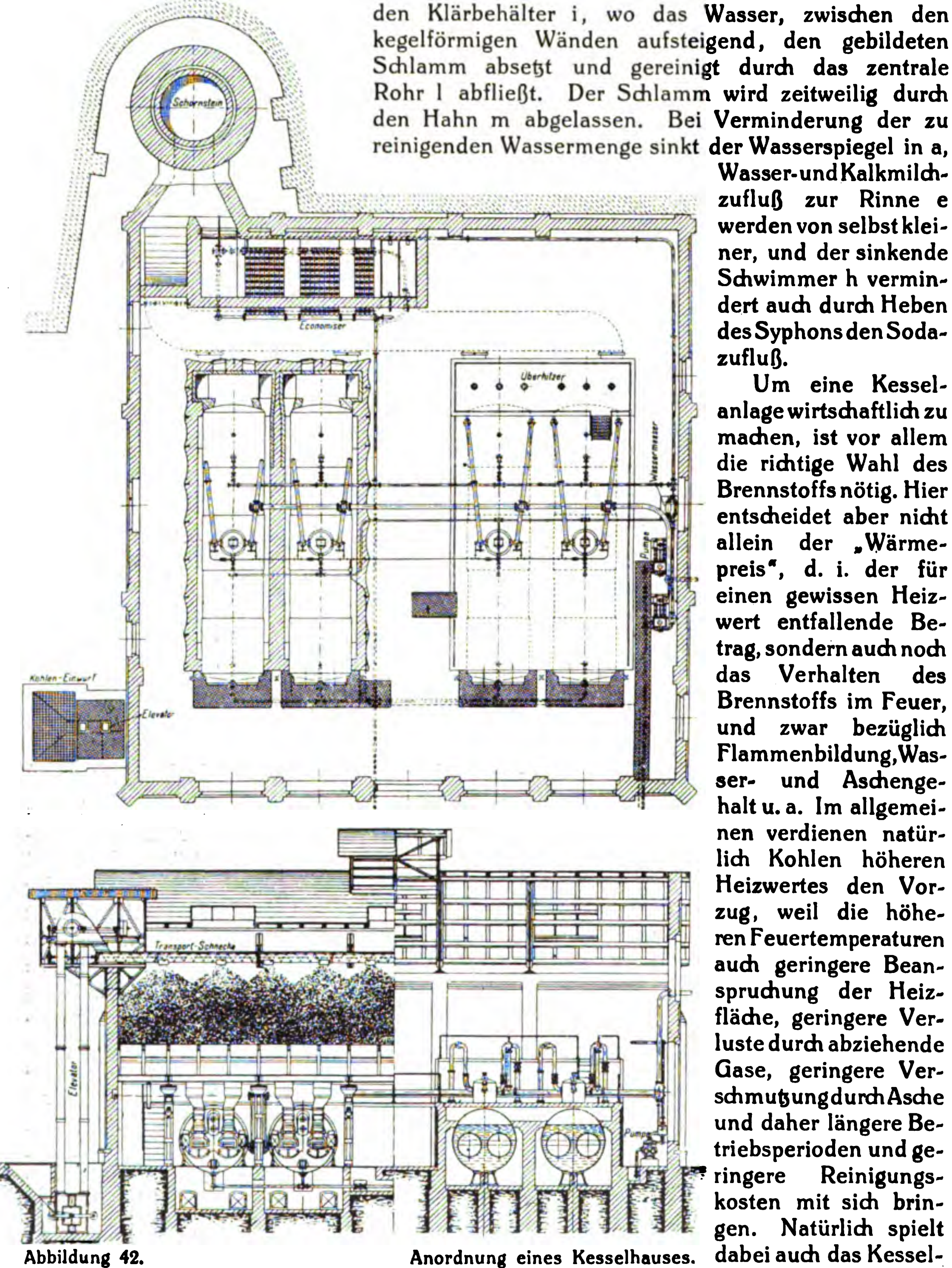


Abbildung 42. Anordnung eines Kesselhauses.

Um eine Kesselanlage wirtschaftlich zu machen, ist vor allem die richtige Wahl des Brennstoffs nötig. Hier entscheidet aber nicht allein der „Wärmepreis", d. i. der für einen gewissen Heizwert entfallende Betrag, sondern auch noch das Verhalten des Brennstoffs im Feuer, und zwar bezüglich Flammenbildung, Wasser- und Aschengehalt u. a. Im allgemeinen verdienen natürlich Kohlen höheren Heizwertes den Vorzug, weil die höheren Feuertemperaturen auch geringere Beanspruchung der Heizfläche, geringere Verluste durch abziehende Gase, geringere Verschmutzung durch Asche und daher längere Betriebsperioden und geringere Reinigungskosten mit sich bringen. Natürlich spielt dabei auch das Kessel-

system, das oft auch neben dem Brennstoff von anderen Betriebsverhältnissen, wie verfügbarer Raum und Art des Wassers, abhängt, eine Rolle. Bei größeren Anlagen geschieht die Brennstoffzuführung zu den Kesseln meist mechanisch. Hierzu dienen neben Siloanlagen noch Elevatoren oder Becherwerke für die Überwindung von Höhenunterschieden, für den horizontalen Transport bei Steinkohlen meist Schnecken, bei Braunkohlen gewöhnlich Transportbänder. Für größere Entfernungen kommen Seilbahnen in Betracht. Die Abbildungen 41 und 42 stellen ein Kesselhaus dieser Art dar. Die Kohle wird mittels Elevators und Transportschnecke den kleinen Silos zugeführt. Über der Elevatorgrube befindet sich ein Rost, der zu große Kohlenstücke fernhält. Die Abbildungen zeigen auch die Anordnung von Überhitzern und einem Economiser, sowie die Anordnung des Topfschen Bogensystems für die Kesseleinmauerung. Zwischen Silo und Feuerung ist überall eine Anzahl von zugespitzten Rundeisenstangen eingeschaltet, die beim Betriebe herausgezogen sind, aber zur Absperrung durch die Kohle hindurchgestoßen werden können, worauf sich der darunter befindliche Schieber leicht abschließen läßt.

2. KOLBENDAMPFMASCHINEN

Die Kolbendampfmaschine ist die am weitesten in allen Einzelheiten entwickelte Kraftmaschine. Wie stets zeigt sich auch hier die Spur der Vollendung darin, daß viele Verwicklungen, die der erste Ausdruck des Bestrebens nach Verfeinerung sind, vermieden und die Grundformen fast überall dieselben geworden sind oder sich doch nur auf wenige, den verschiedenen Verwendungsgebieten entsprechende Typen beschränken.

Der Teil, von dem die Kraftwirkung ausgeht, ist der Dampfzylinder, wenn man nur von der Maschine mit hin und her gehendem Kolben sprechen will. Derselbe bedarf einer sogenannten Steuerung, d. i. einer von der Drehbewegung der Hauptwelle selbst eingeleiteten rechtzeitigen Öffnung und Schließung der zwischen Dampfzuleitung, Kraftzylinder und Ausströmrohr angeordneten Abschlußorgane. Etwas vor Erreichung des Hubendes soll das Dampfeinlaßorgan vor dem Dampfkolben geöffnet, dann je nach der Belastung der Maschine, d. h. je nach dem größeren oder kleineren Widerstande der zu treibenden Arbeitsmaschinen, nach der Umkehr der Bewegungsrichtung des Kolbens früher oder später wieder dicht abgeschlossen werden. Da nach diesem Abschluß der Dampfkolben noch in derselben Richtung fortbewegt wird, dehnt sich der nun hinter ihm befindliche Dampf arbeitleistend aus, bis etwas vor Hubende der Auslaß geöffnet wird und der meist noch etwas höher gespannte Dampf in die Atmosphäre oder den Kondensator abströmt. Der Dampfkolben schiebt nach der Bewegungsumkehr den entspannten Dampf vor sich her, bis die Auslaßöffnung durch die Steuerung wieder abgeschlossen wird, wonach bis zur neuerlichen Öffnung des Einlasses eine Verdichtung des vor dem Kolben befindlichen Dampfes eintritt. Damit ist der Kreisprozeß beendet, und es beginnt eine neue Füllung mit Dampf. Zumeist geschieht der ganze Vorgang auf beiden Kolbenseiten, und wir sprechen dann von einer doppeltwirkenden Maschine. Man erkennt aus dieser kurzen Darstellung, daß die Steuerung die Aufgabe hat, nicht nur das gleichmäßige Öffnen und Schließen der Abschlußteile bei bestimmten Kolbenstellungen zu besorgen, sondern auch durch Veränderung des Moments des Einlaßabschlusses eine Anpassung der Leistung an den augenblicklichen Bedarf zu erzielen, also eine Regelung zuzulassen, die entweder selbsttätig oder auch vom Maschinenwärter nach Willkür erfolgt. Eine solche Regelung durch Veränderlichkeit des in den Dampfzylinder bei jedem Hin- und Rückgang

einströmenden Dampfvolumens hat sich bei allen größeren Ausführungen gegenüber der sogenannten Drosselregelung als vorteilhafter erwiesen; diese besteht darin, daß

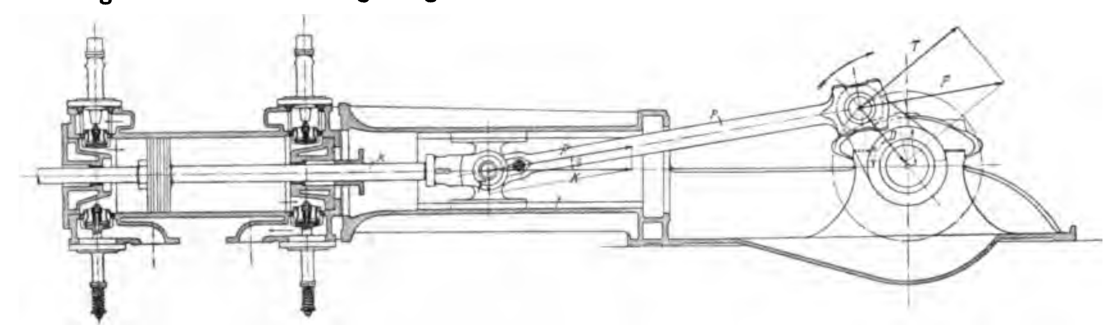


Abbildung 43. Schema einer Dampfmaschine.

man die Füllung gleichbleibend läßt, aber mit Hilfe eines den Querschnitt verengenden Abschlusses den Druck des in den Zylinder gelangenden Dampfes veränderlich macht.

Um nun die hin und her gehende Bewegung des Dampfkolbens in die meist gewünschte Drehbewegung einer Hauptwelle zu verwandeln und gleichzeitig den Kolbenweg zwangläufig zu begrenzen, dient das Kurbelgetriebe, dessen Zusammenhang aus der Abbildung 43 unmittelbar anschaulich hervorgeht. Man erkennt, daß in der gezeichneten Lage der hinter dem Kolben befindliche Raum mit dem Dampfzuführungsrohr in Verbindung steht, dort daher der volle Dampfdruck herrscht, während vor dem Kolben durch die Verbindung mit der Atmosphäre oder einem unter niedrigerem Drucke stehenden Raum ein kleinerer Druck wirkt. Es ergibt sich demnach eine nach rechts gerichtete Kolbenkraft $K = F\ (p_0 - p_1)$, wenn F die Kolbenfläche in qcm, und p_1 die auf 1 qcm entfallenden Drucke hinter p_0 und vor derselben bedeuten. Diese Kraft geht als Druck durch die Kolbenstange k hindurch und wirkt mit der Größe P auf die Pleuel- oder Zugstange p, während die Kreuzkopfführung f durch Vermittlung des Kreuzkopfes die Teilkraft F aufnimmt. Die mit P bezeichnete Kraft ergibt nun ein Drehmoment bezüglich der Wellenachse, das durch die Beziehung $M = P\varrho$ mit ϱ als Hebelarm gegeben erscheint. Während die Kräfte K sich für die doppeltwirkende Maschine durch das Schaubild 44, bezogen auf die Kolbenwege, darstellen lassen, findet man die Drehmomente M, bezogen auf die Drehwinkel, in dem Diagramm Abbildung 45. Es zeigt sich sogleich, daß diese sehr wechselnde Größen aufweisen und zeitweilig sogar negativ werden, während das widerstehende Drehmoment als gleichbleibend angenommen wird. Von dem hier berechneten Moment fällt nun freilich einiges als Verlust ab. Die Reibungen des Dampfkolbens im Zylinder, der Kolbenstange an den Abdichtungsstellen, des Kreuz-

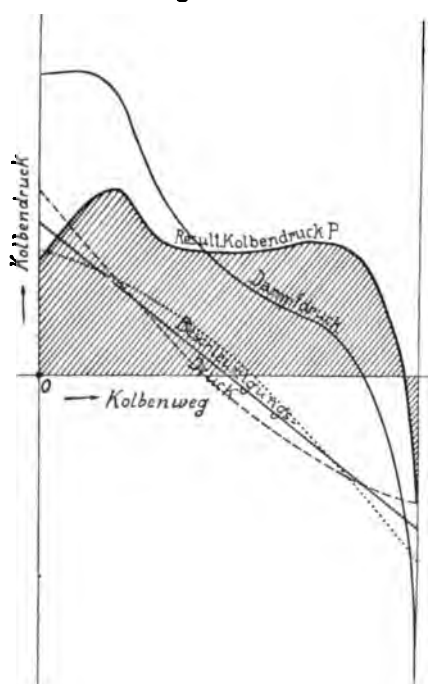


Abbildung 44. Kolbendruckdiagramm.

kopfes in der Führung, der Wellenlager und der Kreuzkopf- und Kurbelzapfen bilden die Ursache.

Eine weitere Änderung des sogenannten Tangentialdiagramms (Abbildung 45) ergibt sich dadurch, daß ein Teil von K zur Beschleunigung des Gestänges verwendet wird. Diese Kräfte lassen sich bei gleichbleibender Drehgeschwindigkeit und bei Voraussetzung einer sehr langen Zugstange annähernd durch die in Abbildung 44 eingetragene Gerade mit der Bezeichnung „Beschleunigungsdruck" darstellen, genauer für die Kurbelseite durch die punktierte, für die Deckelseite durch die gestrichelte Linie. Das Verhältnis zwischen der durch die schraffierte Fläche in Abbildung 44 und 72 gegebenen sogenannten indizierten Hubarbeit und der zugehörigen Leistung an der Welle ergibt den reziproken Wert des mechanischen Wirkungsgrades. Man erkennt ferner, daß in den Schnittpunkten des Tangentialdiagramms für die effektive Leistung mit der Linie des gleichbleibenden Widerstandes kein wirksamer Antrieb auf die Welle erfolgt, und daß alle unter dieser Linie befindlichen Teile eine Verzögerung, die darüber befindlichen eine Beschleunigung darstellen. Der Punkt A gibt also den Moment der größten, Punkt B jenen der kleinsten Geschwindigkeit an. Für die untenliegenden Flächen wäre ein Angehen aus dem Ruhezustand unmöglich, und die Maschine würde auch versagen, wenn die Verzögerung während ihres Be-

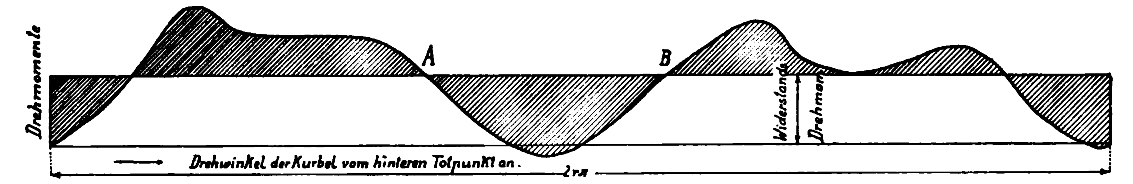


Abbildung 45. Tangentialdruckdiagramm.

stehens den Ruhezustand erreichen würde. Damit dies bei gegebener Drehzahl, also mittlerer Geschwindigkeit, nicht der Fall ist, muß die zu verzögernde Masse eine bestimmte Größe haben. Die Fläche unter der Widerstandsgeraden bedeutet als $\int_{a_1}^{a_2} M d\alpha$ die zugehörige verbrauchte Arbeit, die bekanntlich gleich der Differenz der lebendigen Kräfte beim Anfangs- und Endzustand gesetzt werden kann, also gleich $\frac{G}{g} \cdot \frac{v_1^2 - v_2^2}{2}$, wenn G das Gewicht in kg und v_1 und v_2 die betreffenden Geschwindigkeiten in m-sek bedeuten, während g die Beschleunigung der Schwere in m darstellt. Hieraus läßt sich nun für eine gewählte größte Schwankung der Drehgeschwindigkeit die mittlere Größe von $\frac{Gv^2}{2g} = \frac{\pi^2 n^2}{7200\ g} GD^2$ finden, worin D den Durchmesser eines Schwungrades und n die mittlere Drehzahl in der Minute bedeuten.

Während der Ausström- und Ausschubperiode kühlt nun der entspannte Dampf die Zylinderwände innen stark ab, besonders gegen die Ausströmöffnung hin, wo das Vorüberströmen des Auspuffdampfes stattfindet, so daß der neu einströmende heiße Frischdampf, wenn er gesättigt ist oder sogar Feuchtigkeit in Form winziger Wasserteilchen mit sich führt, an den Wänden kondensiert, wodurch ein Teil desselben für die Arbeitsleistung fast ganz verloren wird. Dies ist um so mehr der Fall, wenn der Temperaturunterschied zwischen Frisch- und Abdampf größer ist, und man hat aus diesem Grunde das sogenannte Temperaturgefälle in zwei, drei oder auch vier Teile geteilt, indem man mehrere Dampfzylinder hintereinander von demselben Dampf durchströmen ließ; man hat hierdurch ganz wesentliche Vorteile erreicht und die

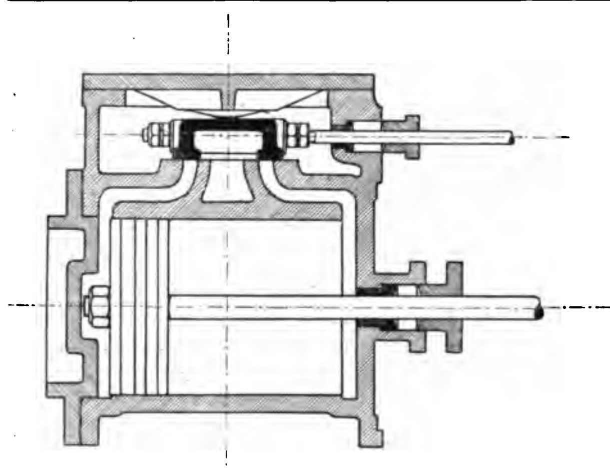


Abbildung 46. Einfache Schiebersteuerung.

Mehrkosten dieser Komplikation um so eher eingebracht, als die Herstellung allzu großer Dampfzylinder schwierig und kostspielig war. Neuerdings, wo fast stets stark überhitzter Dampf zur Verwendung kommt, ist die Bedeutung der Mehrzylinder-Dampfmaschinen gesunken, und man ist sogar vielfach wieder zur Einzylindermaschine zurückgekehrt, indem man nur das Übel der Eintrittskondensation möglichst zu vermeiden sucht. Die Anordnung zweier Dampfzylinder hintereinander unter Einwirkung auf eine gemeinsame Kolbenstange bezeichnet man als Tandem-Verbund-Dampfmaschine, jene, wo die zwei Dampfzylinder gesondert auf zwei Kurbeln einwirken, als zweikurbelige oder zweiachsige Verbund-Dampfmaschine. Die Dreifachexpansionsmaschinen können der Lage der Dampfzylinder nach verschieden angeordnet sein, bei großen Ausführungen werden häufig aus den oben angegebenen Gründen zwei Niederdruckzylinder angewendet.

Damit erscheinen die wesentlichen Teile einer einfachen Dampfmaschine ihrem Zwecke nach dargestellt, und es kann nun dazu geschritten werden, die gebräuchlichen Formen derselben zu besprechen, wobei natürlich nur die wichtigsten Ausführungen berücksichtigt werden können.

Wir beginnen mit den Dampfzylindern. Wie bereits erwähnt, wird heute meist mit hoch überhitztem Dampf gearbeitet. Man hat daher wegen der Gefahr, daß das

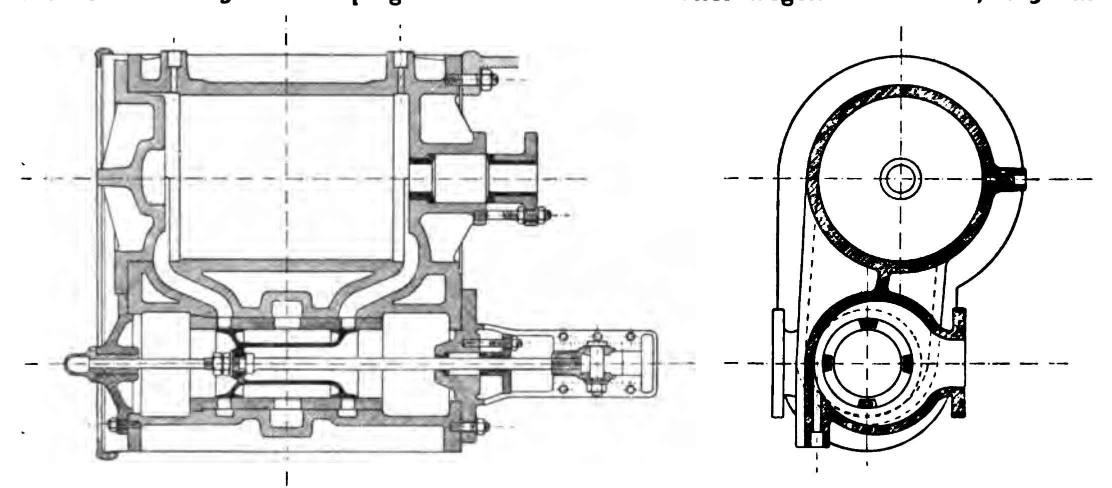
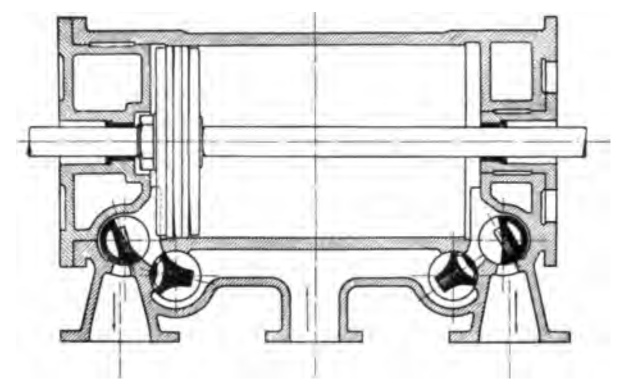


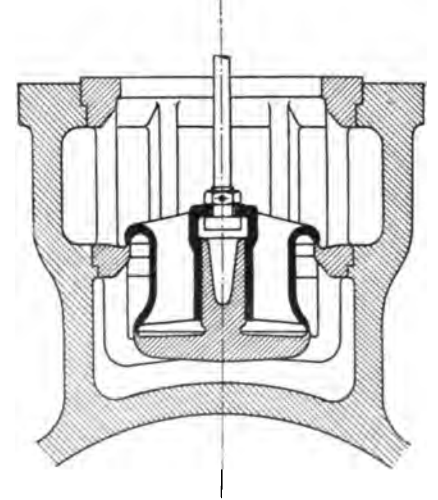
Abbildung 47. Kolbenschieber.

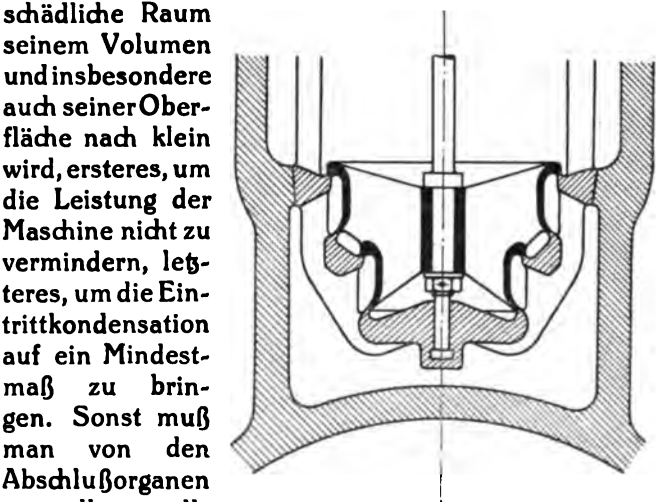
zur Schmierung des Dampfkolbens verwendete Öl zu heiß wird und verkohlt, in den ersten sogenannten Hochdruckzylindern gewöhnlich eher für eine Abkühlung der Zylinderwände zu sorgen als für eine Heizung, wie sie bei gesättigtem Dampf vorteilhaft ist. Daher werden dort meist einfache und, wegen der oft störenden Form-

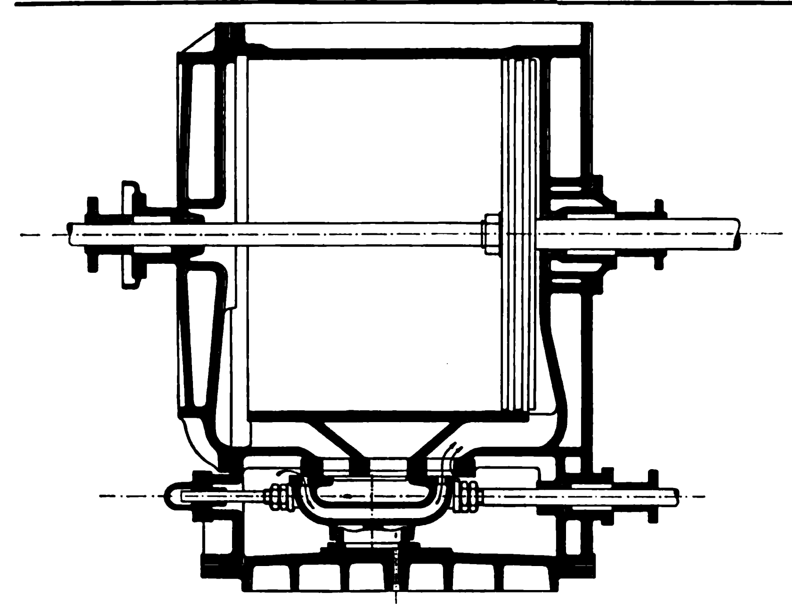

Abbildung 48. Drehschiebersteuerung.

änderungen, möglichst glatte Rohre verwendet, während die nötigen Angüsse, die die Abschlußorgane aufzunehmen haben, die Zylinderfüße u. a., so weit als möglich aus dem eigentlichen Bereich des Kolbenweges gerückt werden. Immerhin halten einzelne Firmen auch bei Hochdruckzylindern für überhitzten Dampf an der Anwendung von Dampfmänteln fest, während die Heizung der Deckel jedenfalls vorteilhaft ist. Der Wert der Mantelheizung hat auch wegen der größeren, jetzt gebräuchlichen Umdrehungszahlen und Kolbengeschwindigkeiten abgenommen.

Die Formen der Dampfzylinder richten sich natürlich in erster Reihe nach der Art der zu verwendenden Abschlußorgane. Als solche kommen Schieber oder Ventile in Betracht, je nachdem die Bewegung derselben in der Abschlußfläche oder senkrecht dazu erfolgt. Die Schieber können sogenannte Flachschieber (Abbildung 46) mit ebener Gleitfläche oder solche mit zylindrischer Gleitfläche sein. In letzterem Falle kann bei Kolbenschiebern (Abbildung 47) die Bewegung in der Richtung der Achse erfolgen oder bei Drehschiebern (Abbildung 48) als Drehung um die Achse bewirkt werden. Die Ventile (Abbildung 49) sind meist zweisitzig, um beim Anhub keinen zu großen Kraftaufwand zu erfordern und um bei kleinen Hüben ausreichende Querschnitte darzubieten; der Dampf strömt fast stets derart, daß der Überdruck das Ventil zu schließen sucht. Bei großen Ausführungen werden auch viersitzige Ventile angewendet (Abbildung 50). Stets ist die Anordnung derart zu treffen, daß der sogenannte schädliche Raum seinem Volumen und insbesondere auch seiner Oberfläche nach klein wird, ersteres, um die Leistung der Maschine nicht zu vermindern, letzteres, um die Eintrittkondensation auf ein Mindestmaß zu bringen. Sonst muß man von den Abschlußorganen vor allem vollkommene Dichtheit verlangen; ferner müssen sie so groß gewählt sein, daß der Dampf während der Zeit ihrer Öffnung nicht in ungünstiger Weise gedrosselt wird. Dazu ist erforderlich, daß die freigegebenen Querschnitte nach der Formel $f = \frac{Fc}{w}$ ausgeführt

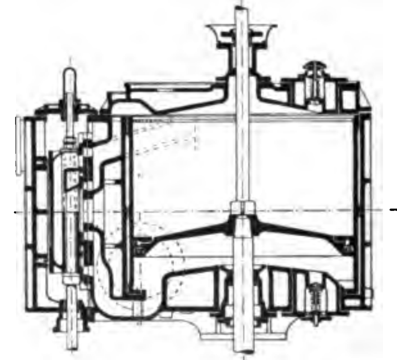

Abbildung 49. Zweisitziges Steuerventil.

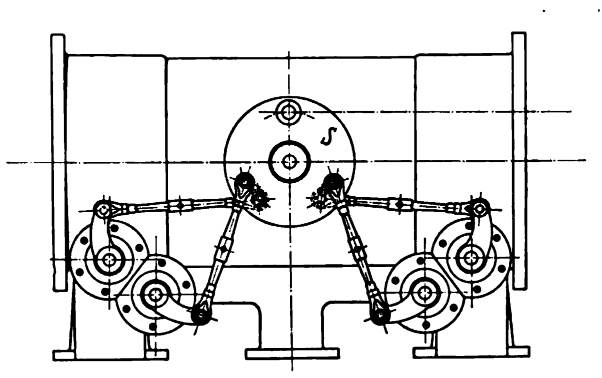

Abbildung 50. Viersitziges Steuerventil.


Abbildung 51. Trickschieber mit Entlastung.

werden, worin F die Kolbenfläche, c die mittlere Kolbengeschwindigkeit und w die Dampfgeschwindigkeit im Ventil bedeuten. w schwankt in verschiedenen Fällen zwischen 25 und 40 m-sek. Um bei Flach- oder Kolbenschiebern insbesondere während der Einströmzeit große Querschnitte zu erzielen, ohne den Schieberhub allzu groß machen zu müssen, benutzt man den sogenannten Trickschieber (Abbildung 51) oder den Pennschieber (Abbildung 52).

Flachschieber eignen sich nicht zum Gebrauch bei überhitztem Dampf, werden daher nur mehr bei kleinen Einheiten oder bei Niederdruckzylindern benutzt. Abbildung 52 stellt einen solchen dar, bei dessen Trickschieber eine sogenannte Entlastung zum Zweck der Verminderung der Schieberreibung und Abnutzung dargestellt ist. Abbildungen 48 und 53 zeigen einen Niederdruck-Dampfzylinder mit Drehschiebersteuerung; hier erscheinen der besseren gesonderten Einstellung der Ein- und Auslaßsteuerung wegen und zur Vermeidung zu großer Schieberdurchmesser Ein- und Auslaßschieber getrennt, ersterer mit Trickkanal versehen, um die sonst zu knappen Durchgangsöffnungen zu verdoppeln. Zur möglichsten Ausnutzung des beschränkten Verdrehungswinkels ist eine sogenannte Corliß-Scheibe S eingeschaltet. In Abbildung 54 ist ein Kolbenschieber-Zylinder dargestellt; da er als Hochdruckzylinder konstruiert ist, hat die Steuerung auch die Regelung zu ermöglichen, der Abschluß der Dampfeintrittsperiode muß demnach veränderlich gemacht werden. Dies geschieht hier dadurch, daß ein Grundschieber G unveränderlich gesteuert wird, die dessen Kanäle von innen her abschließenden Expansionslappen S jedoch vom Regler oder mit der Hand gegeneinander verschoben werden können. Diese Steuerung mit verschiebbaren Expansionslappen vor den Einlaßkanälen eines Grundschiebers ist zuerst von Meyer bei Flachschiebern angewendet worden und führt daher den Namen Meyer-Steuerung. Die gleiche Wirkung erzielt man nach Rider durch Verdrehen der Expansionslappen, wenn diese und die zugehörigen Grundschieberkanäle schräggestellte Abschlußkanten aufweisen. Abbildung 55 zeigt eine derartige Ausführung für Doppelkolbenschieber. Man kann die Veränderlichkeit des Abschlusses zwischen Grundschieber und Expansionsschieber auch dadurch erzielen, daß


Abb. 52. Pennschieber mit Entlastung.



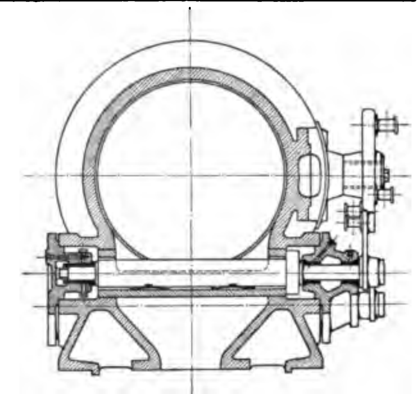


Abbildung 53. Antrieb einer Drehschiebersteuerung mit Corliß-Scheibe.

man den Hub und die Phase des letzteren veränderlich macht, wie bei Besprechung der Steuerungsantriebe S. 150 dargelegt werden wird. Man gelangt so zur Konstruktion der Abbildung 56, die innerhalb des Grundschiebers G einen vollständigen Penn-Expansionsschieber erkennen läßt. Um den schädlichen Raum auf ein Mindestmaß zu beschränken, muß man zur Vermeidung langer Steuerkanäle mit den eigentlichen Abschlußflächen möglichst nahe an die Zylinderbohrung herankommen. Man hat aus diesem Grunde im Verein mit dem Bestreben, die Wände an der Eintrittstelle des Dampfes möglichst wenig zu kühlen, die Steuerorgane in Ein- und Austrittorgane geteilt, wie dies auch in Abbildung 53 aus anderen Gründen geschehen ist. Zu diesem Zwecke zieht man meist Ventile den Schiebern vor. Ab-

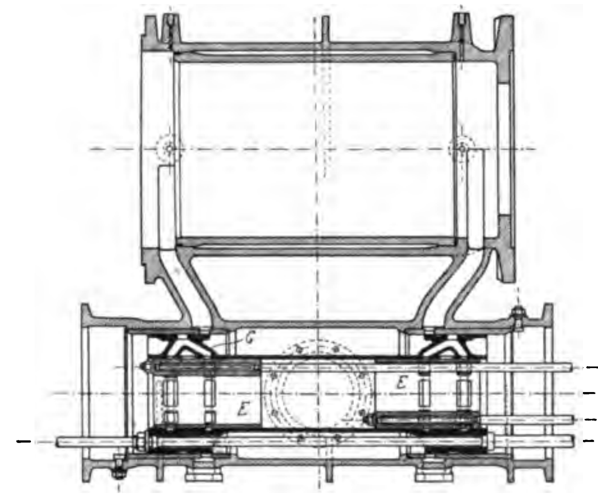


Abbildung 54. Doppelkolbenschiebersteuerung mit verstellbaren Expansionslappen.

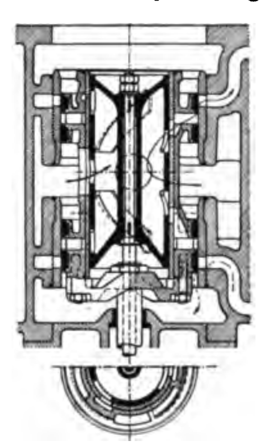
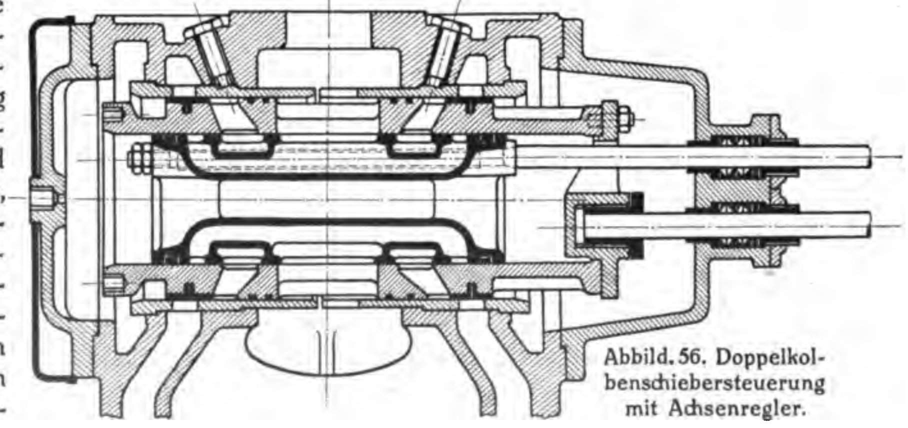
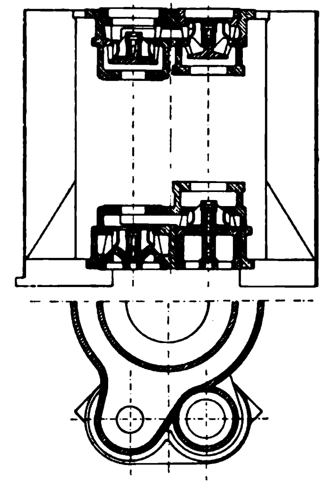


Abbildung 55. Doppelkolbenschiebersteuerung mit drehbarem Expansionsschieber (Rider).



Abbild. 56. Doppelkolbenschiebersteuerung mit Achsenregler.



Abbild. 57. Ventilanordnung bei stehenden Maschinen.

bildung 43 zeigt einen normalen Ventil-Hochdruckzylinder für überhitzten Dampf. Zumeist sind die Ventile in der vertikalen Längenmitte angebracht, die Einlaßventile oben, die Auslaßventile der selbsttätigen Entwässerung wegen unten. Man findet aber auch seitlich angeordnete Ventile. Bei Maschinen stehender Bauart liegen die Ventilgehäuse entweder in den Zylinderdeckeln oder seitwärts (Abbildung 57). In neuerer Zeit hat man auch bei liegenden Maschinen die Abschlußorgane in die Zylinderdeckel verlegt, trotzdem dies bei der Demontierung des Dampfkolbens erhebliche Verwicklungen bereitet. Aber einerseits der Vorteil des kleineren schädlichen Raumes, anderseits die sich von selbst darbietende ausgiebige Deckelheizung haben diese Anordnung beliebt gemacht, und es sind damit insbesondere auch von ihren Urhebern, Van den Kerchove in Gent, äußerst günstige Ergebnisse erzielt worden. Diese Fabrik benutzt jedoch statt der Ventile einzelne vertikal bewegte Kolbenschieber (Abbildung 58).

Stets werden die Dampfzylinder, um Wärmeverluste durch Ausstrahlung zu vermeiden, mit Wärmeschutzmasse umhüllt und meist noch mit einem Blechmantel umgeben. An besonderen Armaturen sind Schmiervorrichtungen für die Dampfkolben, Sicherheitsventile gegen zu hohen Druck, Verschraubungen zum Anbringen von Indikatoren, manchmal besondere Wasser-Ablaßhähne gebräuchlich. Wegen der Ausdehnung der Dampfzylinder bei der Erwärmung, die ohne schädliche Formänderungen ermöglicht werden muß, werden sie nicht fest auf ein gemauertes Fundament aufgeschraubt, sondern mit diesem durch sogenannte Gleitplatten verbunden. Bei Tandemmaschinen geschieht die Verbindung der hintereinanderliegenden Dampfzylinder durch ein Zwischenstück, das bei großen Ausführungen auch ein Traglager für die Kolbenstange aufnimmt (Abbildung 59), manchmal werden die Zylinder auch unmittelbar hintereinander aufgestellt. Eine besondere Anordnung ist die Gleichstrommaschine von Stumpf (Abbildung 60), die in neuerer Zeit viel Anklang findet.

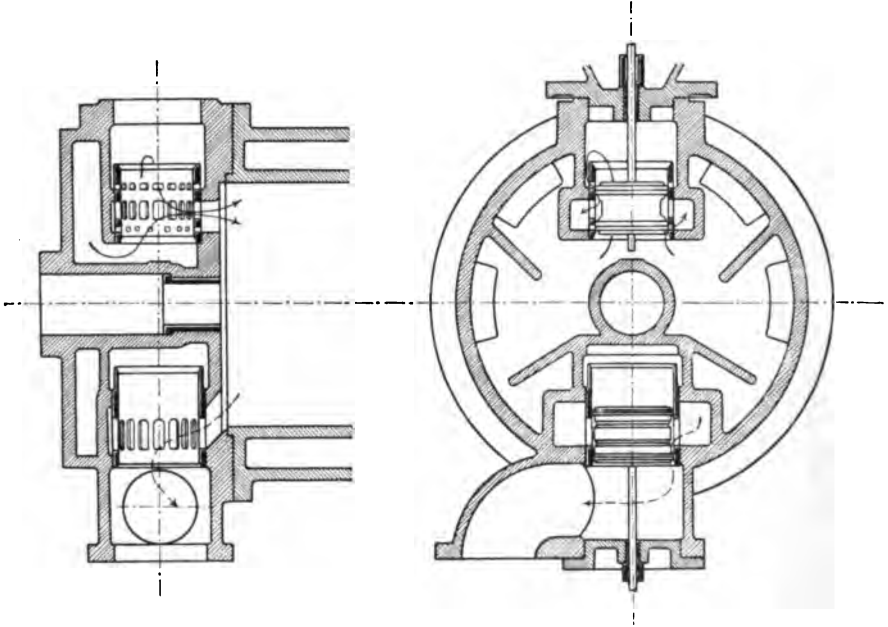


Abbildung 58. Steuerung von Van den Kerchove.

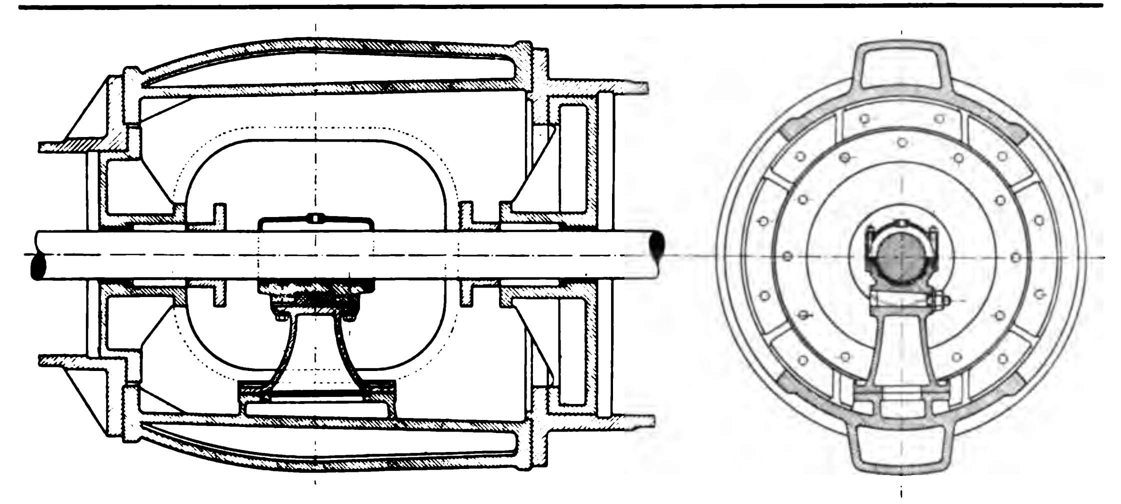


Abbildung 59. Zwischenstück mit Traglager.

Um nämlich zu erzielen, daß der aus dem Zylinder während der Ausströmperiode austretende Dampf nicht an den Wänden des schädlichen Raumes vorbeistreicht und sie abkühlt, verlegt man die Austrittöffnungen an das andere Zylinderende. Sie müssen daher vom Dampfkolben selbst freigegeben werden; dieser wird entsprechend verlängert und dient gleichzeitig als Auslaßorgan, wodurch eine Vereinfachung des Steuerungs-Antriebes gegeben ist. Dabei wird der schädliche Raum durch Wegfall des Auslaßkanals wesentlich kleiner, die Undichtheit des Auslaßventils entfällt, der zur Überwindung der Widerstände in demselben sonst nötige Überdruck bei der Ausströmung wird wegen der großen Auslaßöffnung gering. Hierdurch wird die Wirtschaftlichkeit der Stufenmaschine auch in einem Zylinder fast erreicht, freilich bei weit größeren Stangendrücken und längeren Zylindern. Die Auslaßsteuerung ist hierbei nicht mehr willkürlich, die Verdichtungsperiode ist sehr lang, daher ist diese Ma-

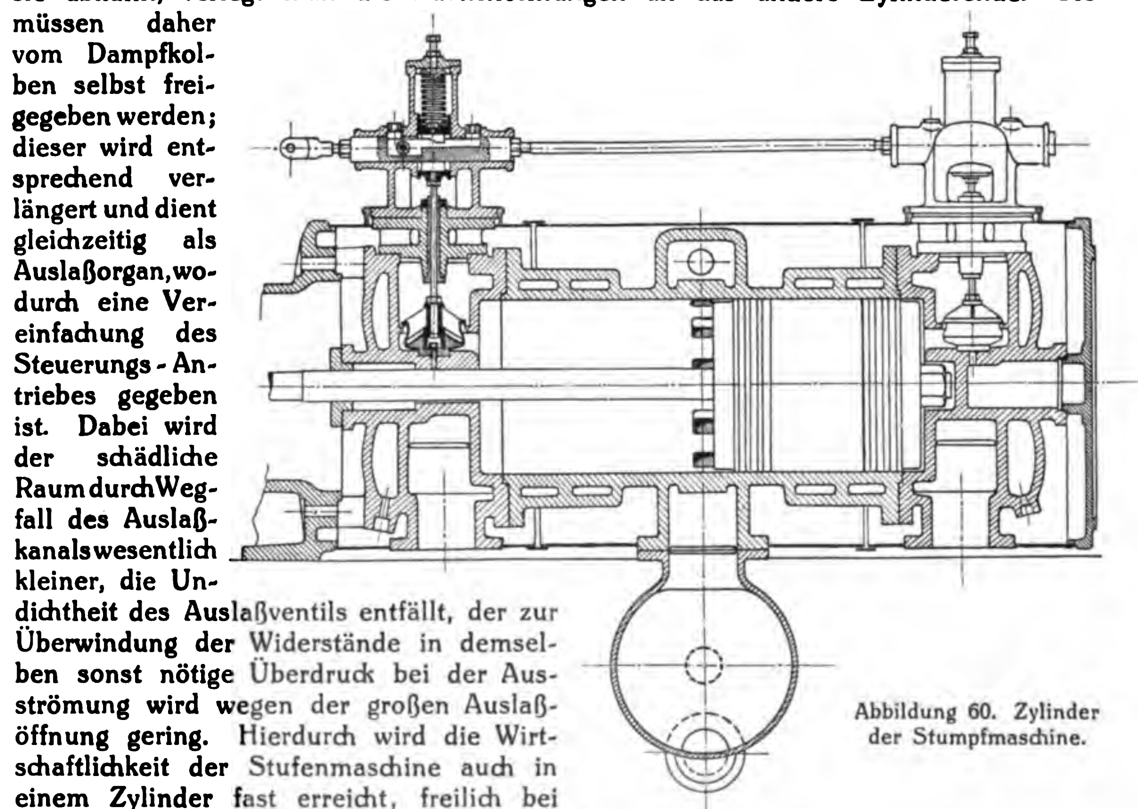


Abbildung 60. Zylinder der Stumpfmaschine.

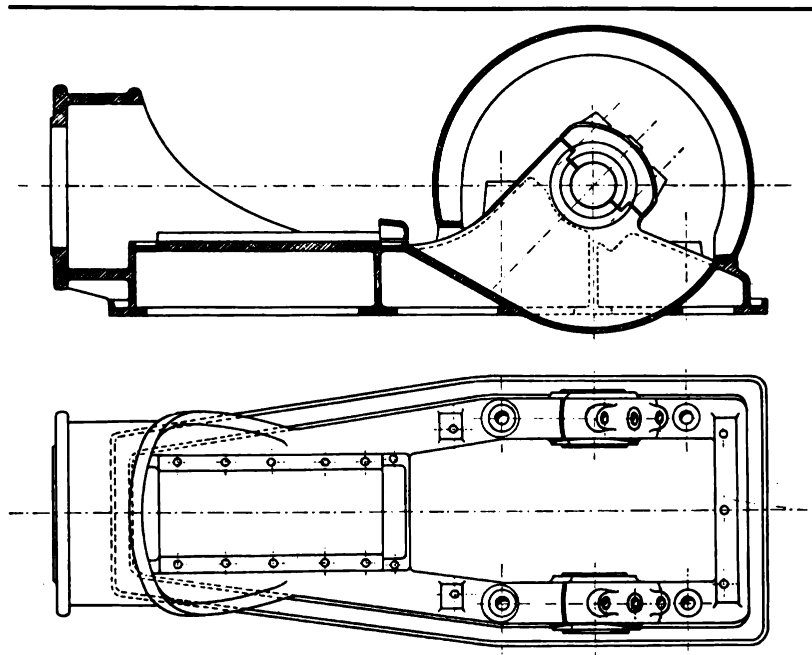


Abbildung 61. Grundplatte für gekröpfte Welle mit Flachführung.

schine besonders für hohes Vakuum geeignet; bei höheren Gegendrücken sind besondere Einrichtungen nötig, damit der Kompressionsdruck nicht zu hoch ansteigt.

Die vom Dampfdruck auf die Dampfzylinder in achsialer Richtung ausgeübten wechselnden Druckkräfte müssen zentrisch aufgenommen werden, da die Zylinder selbst, wie bereits gesagt, wegen der freien Wärmedehnung nicht am Fundament festgehalten werden können. Dies geschieht durch den Rahmen, der die Verbindung zwischen Wellenlager und Zylinder herzustellen und gleichzeitig die Kreuzkopfführung aufzunehmen hat. Diese kann als ebene Geradführung oder als Rundführung ausgebildet sein; die Abbildungen 61 und 62 bieten Beispiele hierfür bei liegenden Maschinen, Abbildung 63 zeigt eine

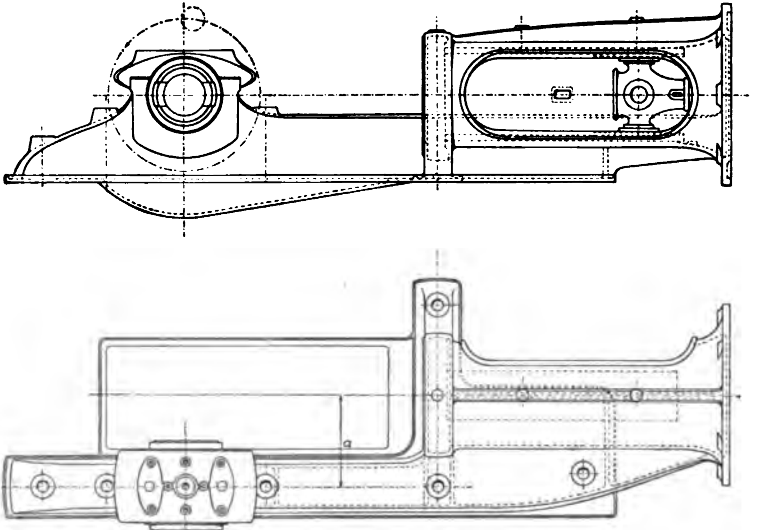


Abbildung 62. Grundplatte für Stirnkurbel mit Rundführung.

ebene Führung bei stehenden Maschinen. Wo gekröpfte Wellen verwendet werden, wie bei Abbildung 61 und 63, ist die Übertragung der Kräfte zentrisch; bei Stirnkurbeln entsteht ein Hebelarm a (Abbildung 62), der den Balken auf Biegung beansprucht. Jedenfalls muß der Rahmen an seinem Vorderteil fest und unverrückbar mit dem Fundament verbunden werden, was durch kräftige Fundamentschrauben geschieht. Die Kurbelwellenlager haben in der Haupt-

sache die Stangenkräfte und das Gewicht von Welle und Schwungrad aufzunehmen. Bei stehenden Maschinen fallen die Richtungen dieser Kräfte im Mittel zusammen, es genügen daher zweiteilige Schalen. Bei liegenden Maschinen hingegen ergibt sich eine Abnutzung im vertikalen Sinne durch die Gewichte, im horizontalen durch die Dampfdruckkräfte, so daß man Nachstellung in beiden Richtungen braucht. Das führt zu vierteiligen Lagerschalen mit seitlicher Nachstellung; ein Beispiel ist in Abbildung 64 wiedergegeben. Bei einachsigen Maschinen mit Stirnkurbel braucht man zur Lagerung der Kurbelwellen noch ein besonderes Hinter- oder Außenlager.

Dampfkolben, Kolbenstange, Kreuzkopf, Pleuelstange und Kurbel zusammen nennt man das Gestänge der Dampfmaschine. Die Dampfkolben werden mit federnden Ringen ausgestattet, die an einer Stelle geschlitzt und auf den Durchmesser der Bohrung etwas zusammengepreßt sind, so daß sie an der Zylinderwand fest anschließen. Die Schmierung erfolgt von

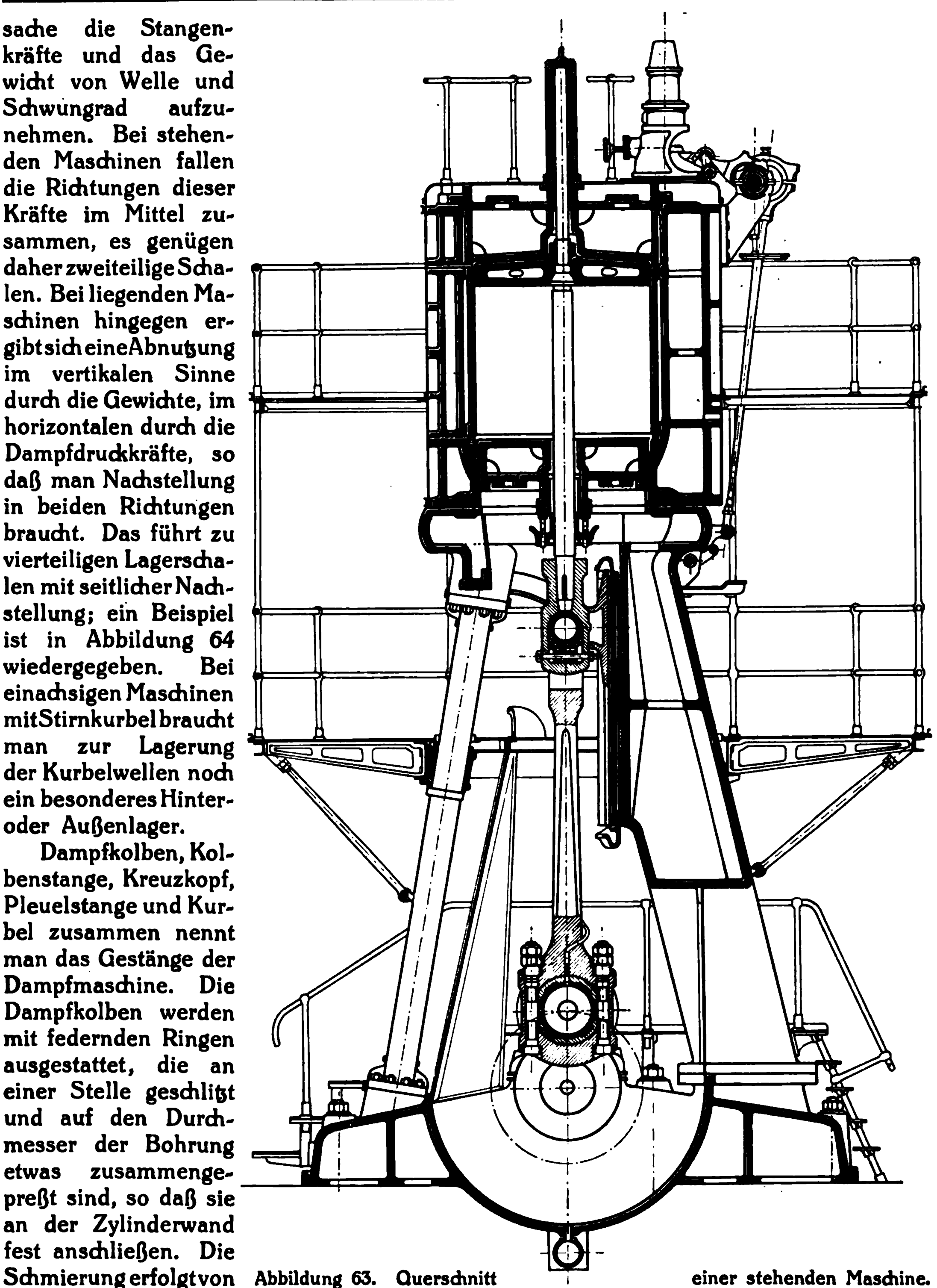


Abbildung 63. Querschnitt einer stehenden Maschine.

außen her (vgl. Abbildung 86). Die Kolbenlänge richtet sich danach, ob die Auflagfläche das ganze Kolbengewicht oder nur einen Teil desselben zu tragen hat; hierzu kann nämlich auch einerseits der Kreuzkopf, anderseits ein Traglager (Abbildung 86) oder eine Tischführung (Abbildung 65) für das hintere Ende der Kolbenstange herangezogen werden. Die Stopfbüchsen, die zur Abdichtung der Kolbenstange dienen, sollen keine seitlichen Kräfte aufnehmen. In neuerer Zeit bevorzugt man Stopfbüchsen mit metallischen Abschlußflächen. Als Beispiel sei die Schwabe-Packung (Abbildung 66) angeführt. Die Kreuzköpfe zeigen verschiedene Formen. Als Beispiele für liegende Maschinen mit Rundführung gelten Abbildung 67 u. 68, für stehende Maschinen mit Geradführung Abbildung 63. In der ersteren umgreift der Kreuzkopf gabelförmig das Lager in der Kurbelstange, bei den letzteren ist die Kurbelstange gegabelt. Entsprechende Einzelheiten der Kurbelstangenlager sind aus den Abbildungen 69 u. 70 zu entnehmen.

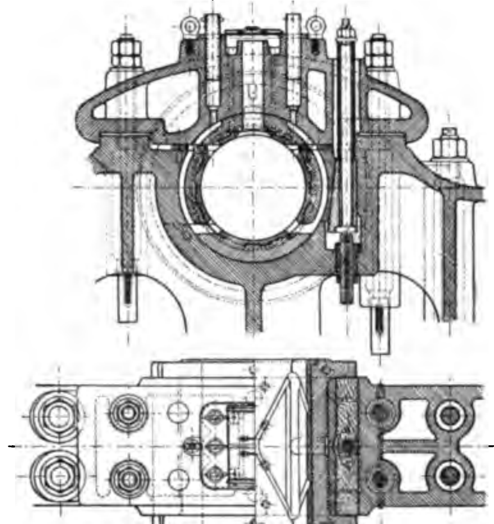
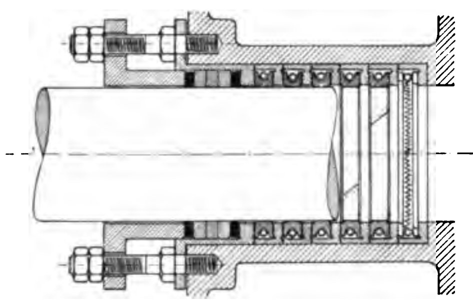


Abbildung 64. Vierteiliges Hauptlager.

Die Kurbeln werden meist aus Stahl geschmiedet, jedoch auch aus Stahlguß hergestellt. Bei den heute üblichen großen Drehzahlen ist die teilweise Ausgleichung der Fliehkräfte durch Gegengewichte empfehlenswert.

Abbildung 65. Hintere Kolbenstangenführung.

Nachdem die wesentlichsten Formen der eigentlichen kraftaufnehmenden Teile einer Dampfmaschine besprochen sind, sollen kurz die Grundzüge ihrer Berechnung und der Festlegung ihrer Abmessungen gegeben werden. Dem Konstrukteur liegt zumeist außer der verlangten Normalleistung und Anordnung der Dampfmaschine auch schon die Angabe einer bestimmten Umdrehungszahl, des verfügbaren Dampfdrucks und der Überhitzung, des Gegendrucks, wenn keine Kondensation verlangt wird, und endlich



Abbild. 66. Stopfbüchsenpackung von Schwabe.

der gewünschten Bauart vor; dementsprechend wird ihm auch gewöhnlich ein höchstens zulässiger Dampfverbrauch vorgeschrieben. Diese Angaben und Vorschriften hat der Projektant zu ermitteln, dieselben hängen von der örtlichen Beschaffenheit, der Größe der Anlage, der Art der anzutreibenden Arbeitsmaschinen ab. Hauptsächlich maßgebend ist dabei die Erreichung geringster Betriebskosten, d. i. der Summe der sogenannten direkten Betriebskosten (Kohlenverbrauch, Wasserverbrauch, Ölverbrauch, Bedienung und Wartung, Reparaturen u. a.) und der indirekten Betriebskosten (Amortisation und Verzinsung des Anlagekapitals). Freilich spielen auch noch andere Umstände mit, wie

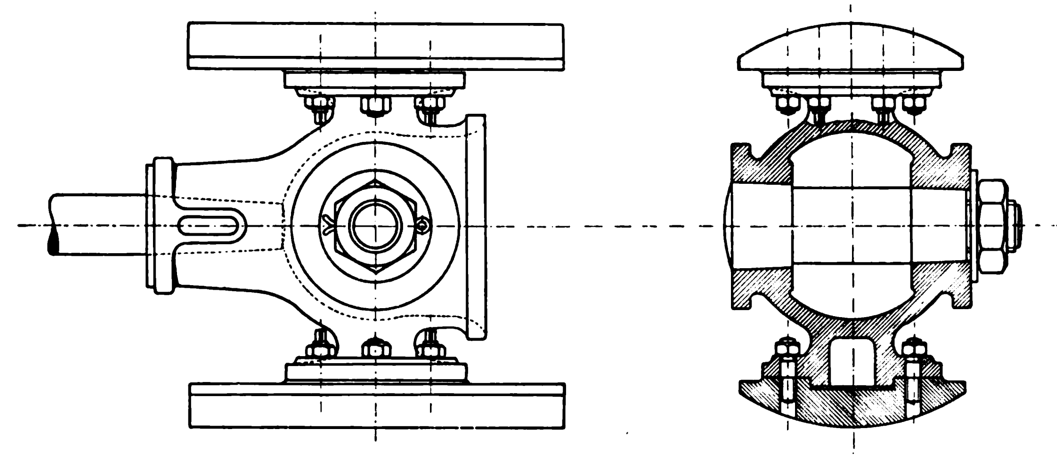


Abbildung 67. Kreuzkopf mit einfacher Pleuelstange.

etwa Betriebssicherheit, Bequemlichkeit der Wartung, Anschaffungskosten als solche, u. a.

Die indizierte Leistung Ni wird aus der verlangten effektiven Ne durch die Be-

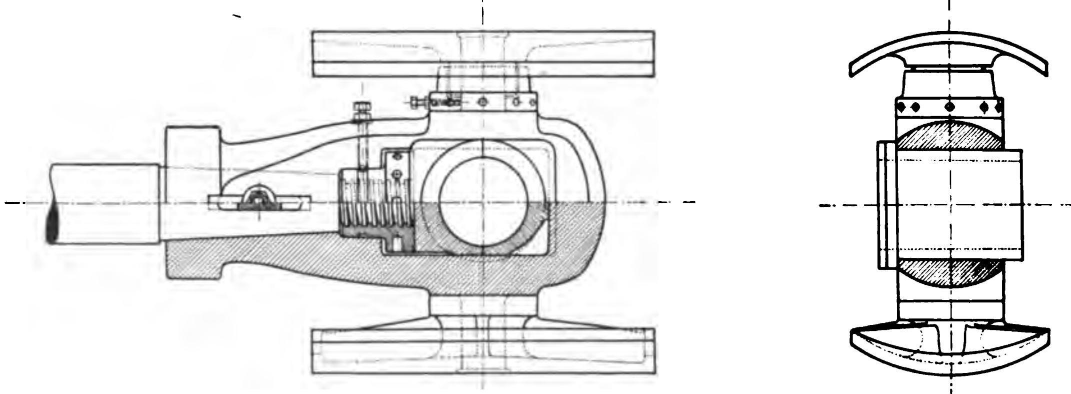


Abbildung 68. Kreuzkopf mit gegabelter Pleuelstange.

ziehung: $N_i = \frac{N_e}{\eta}$ bestimmt, wenn η den mechanischen Nutzeffekt darstellt. Anderseits kann die indizierte Leistung aus dem Dampfdiagramm bestimmt werden. Die

Kolbenkraft $K = F(p_0 - p_1)$ ergibt nämlich auf dem Kolbenwege s eine Arbeitsleistung: $A_i = \int_0^s K ds = F \int_0^s (p_0 - p_1) ds$. Ist p_m der mittlere Druck: $p_m = \frac{\int_0^s (p_0 - p_1)\, ds}{s}$, so wird für einen Kolbenhub: $A_i = F p_m s$ und für eine Sekunde die Arbeitsleistung in Pferdestärken: $N_i = \frac{F p_m 2sn}{60.75}$, worin n die Drehzahl in einer Minute darstellt. Es würde sich noch darum handeln, den Wert von p_m in den verschiedenen Fällen zu ermitteln. Bei Untersuchung einer Dampfmaschine geschieht dies mittels

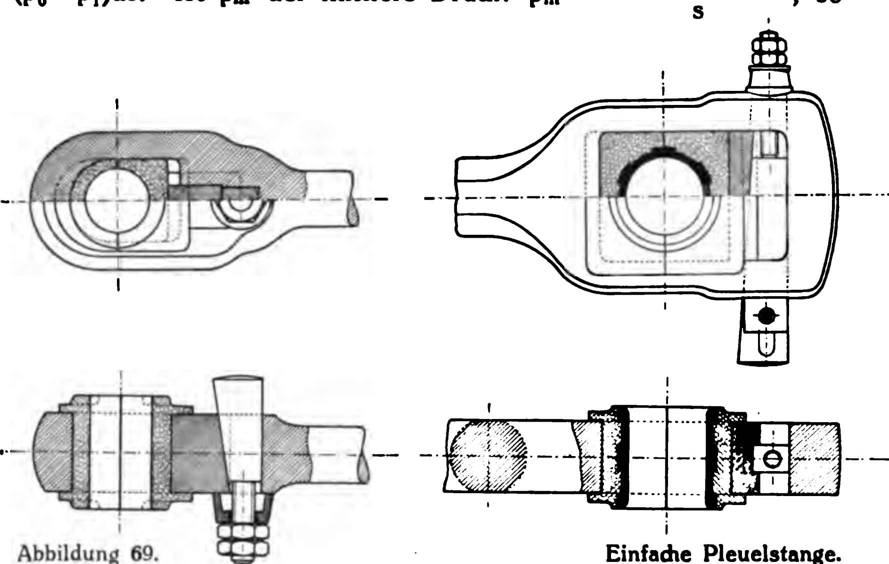


Abbildung 69. Einfache Pleuelstange.

Indikators (Abbildung 71), der auch zur Beurteilung der Steuerung und der Dichtheit der einzelnen Organe dient. Dieser Apparat besteht aus einem kleinen Dampfkolben in einem entsprechenden Zylinder, der einerseits dem jeweiligen Dampfdruck, anderseits dem äußeren Luftdruck unterworfen ist. Damit nun jedem Dampfdruck eine ganz bestimmte Stellung des Kolbens entspricht, ist dieser durch eine Feder belastet, bei der die Formänderung recht genau im Verhältnis zu der darauf wirkenden Kraft steht. Diese Deformation gibt also ein Mittel, den Druck zu messen, jeder Lage des Dampfkolbens entspricht ein bestimmter Dampfdruck unter demselben. Ein Schreibstift macht mittels eines Lenkers die Bewegung des Dampfkolbens in gleicher Richtung mit. Um nun auch die Kolbenstellung der Dampfmaschine in einem gegebenen Augenblick

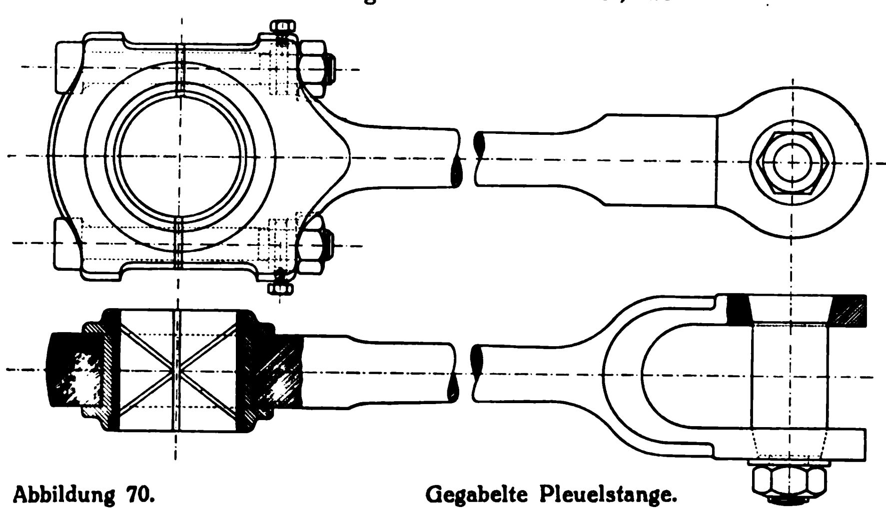


Abbildung 70. Gegabelte Pleuelstange.

gleichzeitig mit dem Dampfdruck festzulegen, muß der vor dem Schreibstift im rechten Winkel zu dessen Bewegungsrichtung vorübergezogene Papierstreifen eine dem Dampfkolben entsprechende Bewegung ausführen. Das geschieht durch die Trommel des

Indikators und einen sogenannten Hubreduktor; die verhältnismäßige Verkleinerung des Kolbenhubs geschieht durch Hebel oder Rollenübersetzung. Schließt man die untere Seite des Indikatorzylinders unter Zwischenschaltung eines Hahns an den Innenraum des Dampfzylinders an, so erhält man für eine Einzylindermaschine mit freiem Auspuff ein Diagramm (Abbildung 72), für eine zweikurbelige Verbundmaschine mit Kondensation ein Diagramm (Abbildung 73), endlich für eine Dreifach-Expansionsmaschine mit Kondensation ein Diagramm (Abbildung 74).

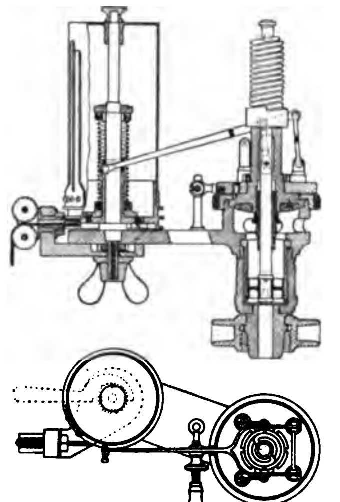


Abbildung 71. Indikator.

Bei den Mehrzylindermaschinen sind hierbei die Abszissenmaßstäbe im Verhältnis der Zylindervolumina Vol. $= F \times s$, der schädliche Raum ist beim Niederdruckdiagramm an das Zylindervolumen angesetzt und von dem so erhaltenen Nullpunkt bei den übrigen Zylindern abgetragen.

Der Einfluß überhitzten Dampfes zeigt sich besonders durch rascheres Sinken der Expansionslinie. Aus diesen Diagrammen lassen sich sowohl die Kolbenkraftlinien nach Abbildung 2 als auch die Größe des mittleren Druckes p^m bestimmen. Um letzteren Wert zu erhalten, braucht man nur die von den Linien des Diagramms eingeschlossenen Flächen durch die Diagrammlänge zu dividieren; bei Mehrzylindermaschinen bezieht man diesen Mitteldruck meist auf das Volumen des Niederdruckzylinders. Es zeigt sich, daß für jede Maschinengattung bei gegebenen Verhältnissen ein bestimmter mittlerer Druck p_m für die Normalleistung N_i am vorteilhaftesten ist. Man kann daher, wenn diese gegeben erscheint und n gewählt ist, nach obiger Formel rasch $F.s = Vol.$, d. i. das Volumen des Niederdruckzylinders, finden. Die in der Fabrik vorhandenen Modelle oder auch konstruktive Rücksichten lassen dann die Kolbenfläche F und den Kolbenhub s gesondert finden. Das Verhältnis der Hoch- und Mitteldruckzylindervolumina zum Niederdruckzylinderinhalt hängt insbesondere davon ab, ob eine weit über die Normalleistung hinausgehende zeitweilige Überlast vorkommt, oder ob überhaupt eine Erhöhung der erforderlichen Leistung in Aussicht steht. Sonst sind möglichste Ausgleichung der Temperaturunterschiede in den einzelnen Zylindern, möglichst gleiche größte Kolbenkräfte zur Ausnutzung der meist gleich bemessenen Gestängeteile anzustreben. In den Schaulinien 72 bis 74 sind etwa mittlere Verhältnisse angenommen. Zur ge-

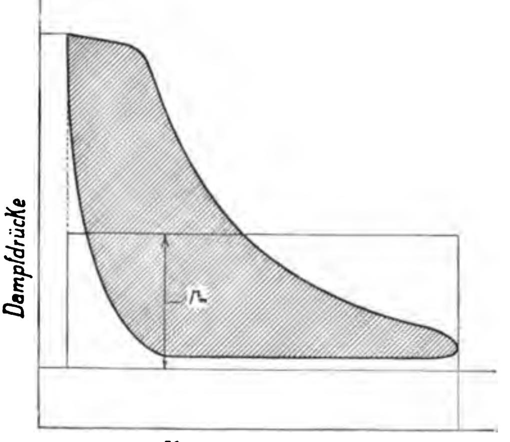


Abbildung 72. Dampfdiagramm einer Einzylindermaschine.

Abbildung 73. Dampfdiagramm einer Verbundmaschine.

naueren Bestimmung aller in Betracht kommenden Verhältnisse umschreibt man den Schaulinien eine sogenannte Mariottesche Linie (vgl. Abschnitt III a) und bestimmt die von derselben zwischen den Linien größten Dampfdruckes und größten Dampfvolumens dargestellte Fläche, was sich rechnerisch leicht tun läßt. Nennt man das Verhältnis zwischen Eintritts- und Enddruck dieser durch die Gleichung $p.v = \text{Konst.}$ dargestellten Linie den Expansionsgrad ε, so ist diese Fläche mit p_0 als Eintrittsdruck: $f = \frac{p_0 V}{\varepsilon}(1 + \log \varepsilon)$, worin V das größte im Niederdruckzylinder vorkommende Dampfvolumen, d. i. die Summe von $\text{Vol.} = F.s$, und dem schädlichen Raum S ist und $\log \varepsilon$ den natürlichen Logarithmus bedeutet. Die Erfahrung lehrt nun, daß die Summe der von den Schaulinien eingeschlossenen Flächen f_i bei gegebenen Verhältnissen stets einen wenig veränderlichen Teilbetrag von f ergibt; man nennt das Verhältnis den Völligkeitsgrad φ. Die Leistung einer Maschine in indizierten Pferdestärken ergibt sich demnach mit: $N_i = \frac{f_i 2n}{60.75}$ bei $f_i = \varphi \frac{p_0 V}{\varepsilon}(1 + \log \varepsilon)$. Führt man statt ε den Wert $e = \frac{V}{\varepsilon}$ ein, d. i. die Länge der ideellen Admissionslinie, so erhält man $f_i = \varphi\, p_0 e\, (1 + \log \frac{V}{e})$, während $\frac{e\text{-}\sigma}{\text{vol}}$ mit σ als schädlichen Raum des Hochdruckzylinders und vol als Hochdruckvolumen den Füllungsgrad im Hochdruckzylinder angibt. Man ersieht aus diesen Andeutungen etwa den Gang der Berechnung der Zylinderabmessungen bzw. der Füllungsgrade für gegebene Leistungen.

Abbildung 74. Dampfdiagramm einer Dreifachexpansionsmaschine.

Der Antrieb der Zylinderabschlußorgane erfolgt durch die sogenannte äußere Steuerung. Diese ist gewöhnlich für den Dampfauslaß sowie für Mittel- oder Niederdruckzylinder unveränderlich, während nur die Einströmverhältnisse am Hochdruckzylinder durch einen Regler beeinflußt werden, der auch bei wechselnden Belastungen stets annähernd die gleiche Drehzahl festhält. Nach früheren Auseinandersetzungen (S. 135 u. 140) kann dies durch Beeinflussung des Momentes des Abschlusses der Dampfeinströmung geschehen, während der Moment des Öffnens gleichbleibt.

Gewöhnlich ist der für die Steuerung erforderliche Hub verhältnismäßig klein, und außerdem ist meist an der betreffenden Stelle kein freies Wellenende verfügbar. Deshalb benutzt man zum Antrieb der Schieber gewöhnlich ein Exzenter (Abbildung 75), das sich nur in konstruktiver Hinsicht von einer Kurbel unterscheidet; der Mittelpunkt des Exzenterringes E beschreibt nämlich einen Kreis, seine Bewegung wird von der Exzenterstange s auf eine Geradführung oder einen schwingenden Hebel übertragen.

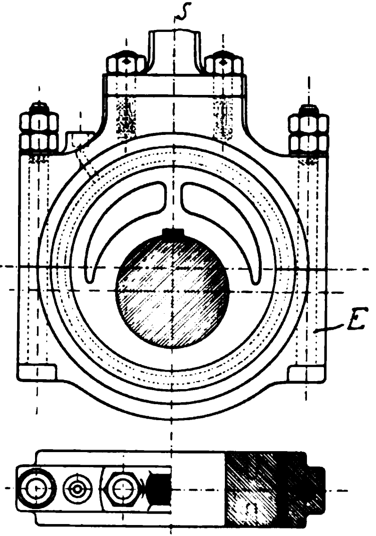


Abbildung 75. Exzenter.

Bei Schiebern, deren hin und her gehende Bewegung mit der Achse der Dampfmaschine übereinstimmt, und auch bei quer dazu angeordneten Drehschiebern geschieht ihr Antrieb gewöhnlich unmittelbar von der Hauptwelle aus. Bei Ventilen oder normal zur Zylinderachse bewegten Schiebern hingegen wird meist die Anord-

nung einer Steuerwelle vorgezogen, die in der Achsrichtung der Maschine gelagert und durch Kegel- oder Schraubenräder mit gleicher Drehzahl von der Hauptwelle angetrieben wird. Dort, wo ein Überschleifen über die Abschlußkante unerwünscht oder unmöglich ist, ist eine besondere Einrichtung erforderlich. Zwei gebräuchliche Formen

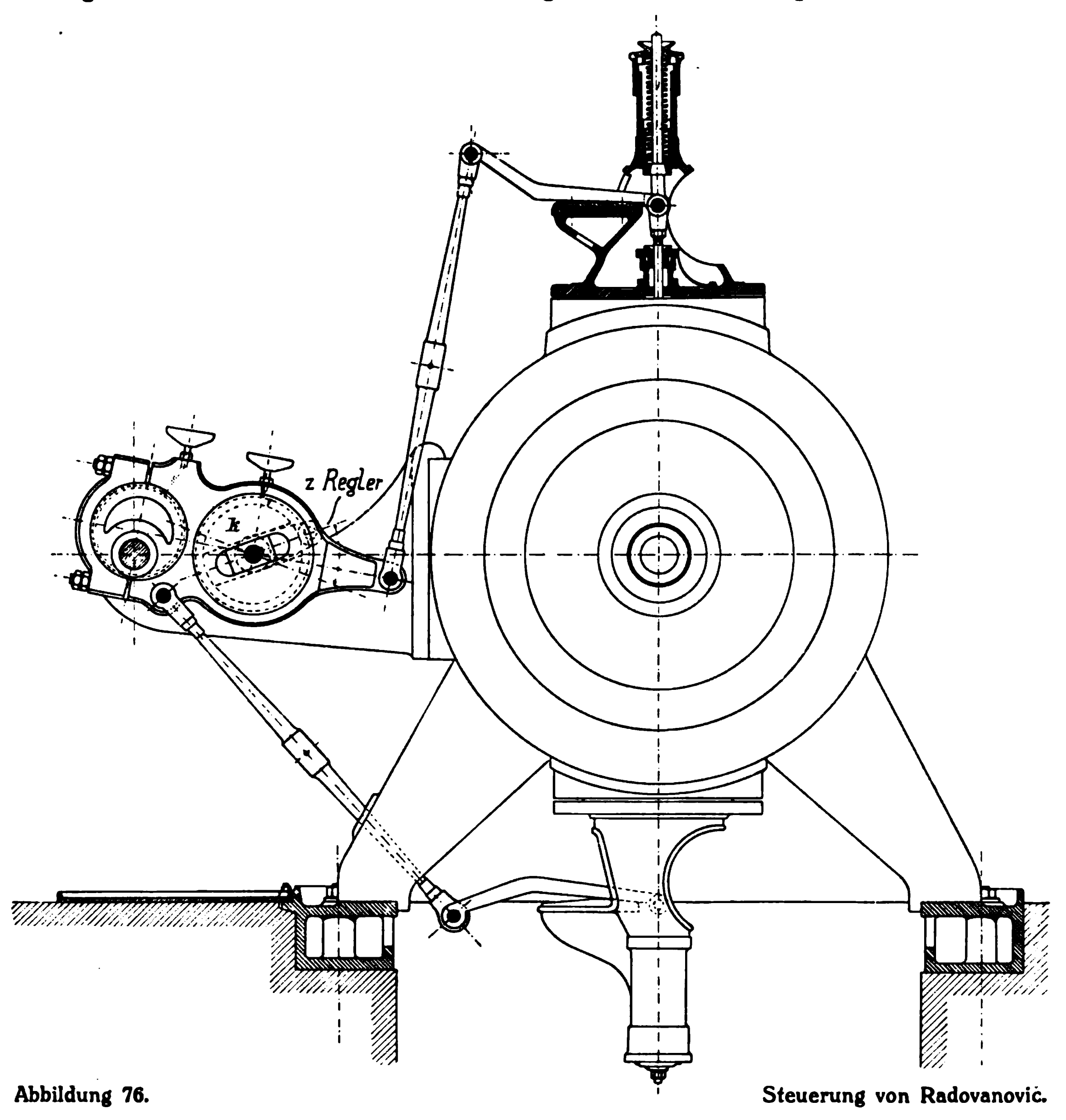


Abbildung 76. Steuerung von Radovanovič.

sind in den Abbildungen 76, 77 und 78 als sogenannte Wälzhebel und Daumenrolle dargestellt. Das Öffnen des Ventils wird bei beiden durch einseitige Berührung zweier Elemente bewirkt. Nach Schluß des Ventils hingegen wird die Berührung aufgehoben, und der mit dem Ventil verbundene Teil bleibt fest stehen, während der zweite seine Bewegung ungehindert fortsetzen kann. Die Konstruktionen müssen der Bedingung genügen, daß das Zusammentreffen der zwei wirksamen Flächen ohne

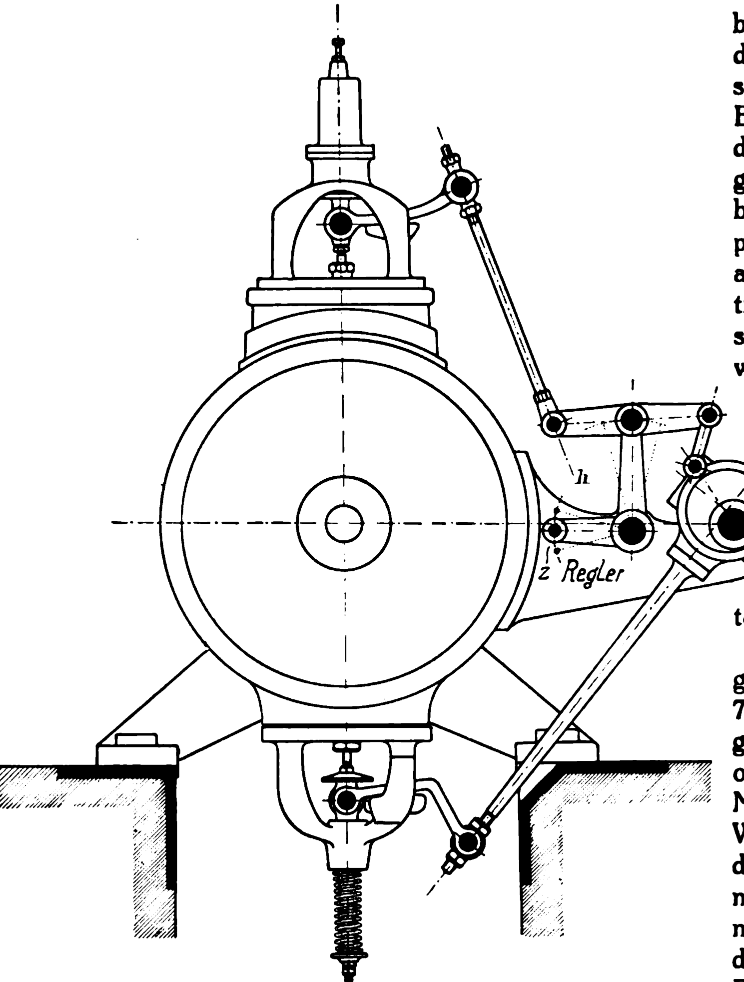


Abbildung 77. Steuerung von Widnmann.

beträchtlichen Stoß und auch das Aufsetzen des Ventils auf seinen Sitz langsam erfolgt. Beim Wälzhebel wird dies dadurch erreicht, daß in den genannten kritischen Augenblicken der Momentandrehpunkt des Ventilhebels nahe am Anhängepunkt der Ventilspindel liegt, so daß dieser auch bei rascher Bewegung des Hebels nur kleine Geschwindigkeit hat, bei der Daumenrolle dadurch, daß der Schwingdaumen an den betreffenden Stellen einen sanften Anlauf zeigt.

Die mit den Einrichtungen nach Abbildung 76 bis 78 ausgestatteten Steuerungen nennt man zwangläufige oder besser kraftschlüssige. Man kann aber auch in der Weise vorgehen, daß man die Berührung eines aktiven mit einem passiven Mitnehmer plötzlich aufhebt und das Ventil frei fallen läßt. Damit es nicht zu rasch auf den Sitz stößt, wird dann ein Luftpuffer (Abbildung 79) oder ein Ölkatarakt nach Collmann (Abbildung 80) eingebaut. Beide Abbildungen zeigen auch, wie die beiden Mitnehmer außer Eingriff gebracht werden, hier sieht man unmittelbar, daß eine Verstellung der Ausklinkvorrichtung zur Füllungsänderung behufs Regelung benutzt werden kann. Solche Steuerungen, deren es eine große Zahl von Konstruktionen gibt, nennt man Auslösesteuerungen.

Verwickelter als bei diesen ist die Regelung bei kraftschlüssigen Steuerungen, weil da die zwangläufige Bewegung des Antriebes selbst veränderlich gemacht werden muß. Dies kann unter Beibehaltung des Exzenterkreises durch Veränderung der Abnahmerichtung der Bewegung für den Einlaß allein geschehen, wie dies in Abbildung 77 dargestellt ist (Widnmann-Steuerung). Eine Verdrehung des Hebels h durch den Regler kann unter angenäherter Beibehaltung des Öffnungsmoments die Abschlußzeit ändern. In Ab-

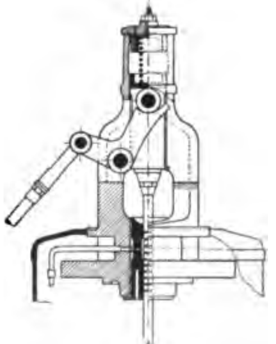


Abbildung 78. Steuerung von Lentz.

bildung 76 ist hingegen dargestellt, wie man durch Verdrehen einer Kulisse k die Abnahmelinie für die Zugstange unmittelbar verändern kann, so daß die Füllung ohne Änderung des Voreinströmens der Belastung entsprechend eingestellt werden kann (Radovanovič-Steuerung). In neuerer Zeit werden vielfach Achsenreglersteuerungen benutzt.

Bei Schiebern werden zur Regelung ebenfalls Achsenregler (vgl. Abbildung 85) oder Doppelschiebersteuerungen angewendet (vgl. Abbildung 54, 55 u. 56), bei denen die Lage der Expansionslappen geändert wird. Dies geschieht unmittelbar durch Verdrehen der Rider-Expansionsschieber (Abbildung 55) oder durch die in Abbildung 81) dargestellte vergrößerte Schraube (Guhrauersteuerung).

Wir gelangen nun dazu, die Grundbegriffe der Regler selbst zu besprechen. Sie lassen sich aus ihrer Aufgabe herleiten. Diese besteht darin, die Drehzahl der Kraftmaschinen auch bei verschiedenen Belastungen stets wenigstens angenähert festzuhalten. Bei Dampfmaschinen verlangt die Änderung der Leistung jedesmal eine entsprechende mechanische Verstellung im Steuergetriebe, die der Regler einzuleiten hat; er muß demnach einen Teil besitzen, der dies durch seine Bewegung tut. Würde nämlich bei unveränderter Steuerung die Belastung der Maschine zum Beispiel vergrößert, so würde im Tangentialdiagramm (Abbildung 45) die entsprechende gerade Linie höher hinaufrücken, während die Linie der von dem Dampfzylinder herrührenden Drehmomente gleichbleibt. Die Maschine würde daher verzögert werden, immer langsamer laufen und endlich zum Stillstand kommen. Man muß die nach der Belastungsänderung eintretende Änderung der Geschwindigkeit benutzen, um die Füllung zu vergrößern; also Kräfte anwenden, die ent-

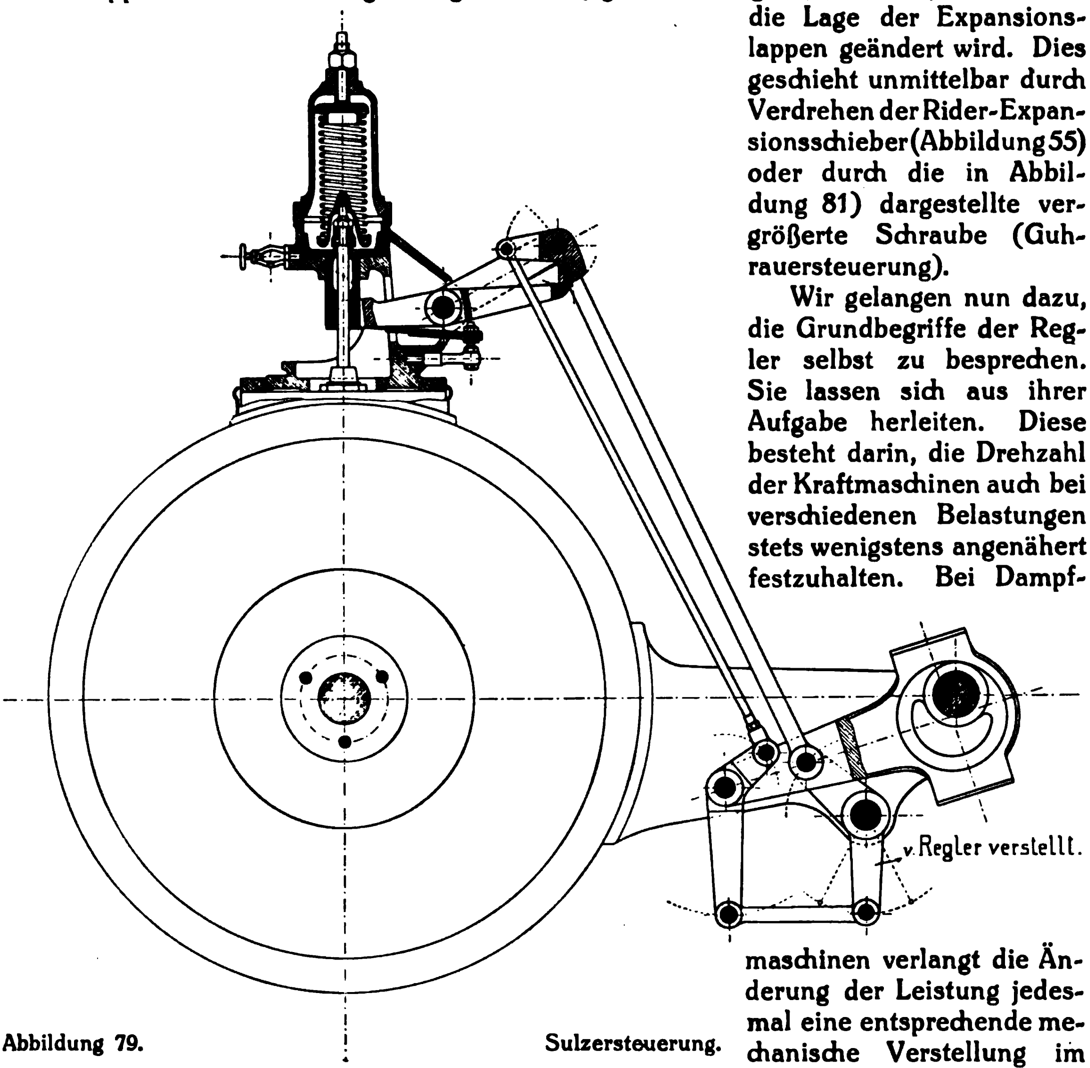


Abbildung 79. Sulzersteuerung.

weder von der Geschwindigkeit abhängen und bei Änderung derselben den Gleichgewichtszustand stören oder die unmittelbar der Beschleunigung bzw. Verzögerung entsprechen. Da diese letzteren an keine bestimmte Geschwindigkeit gebunden sind, können sie nur zur zeitweisen Unterstützung der ersteren, niemals aber selbständig verwendet werden. Bei der uns am zugänglichsten gleichmäßigen Drehbewegung ist es am einfachsten, die Fliehkraft heranzuziehen, die allein von der augenblicklichen Lage eines Körpers gegen die Drehachse und von der Drehgeschwindigkeit abhängt. Ist G sein Gewicht, g = 9,81 m die Beschleunigung der Schwere, r der Abstand des Schwerpunktes von der Drehachse, so ist die im Massenmittelpunkt angrei-

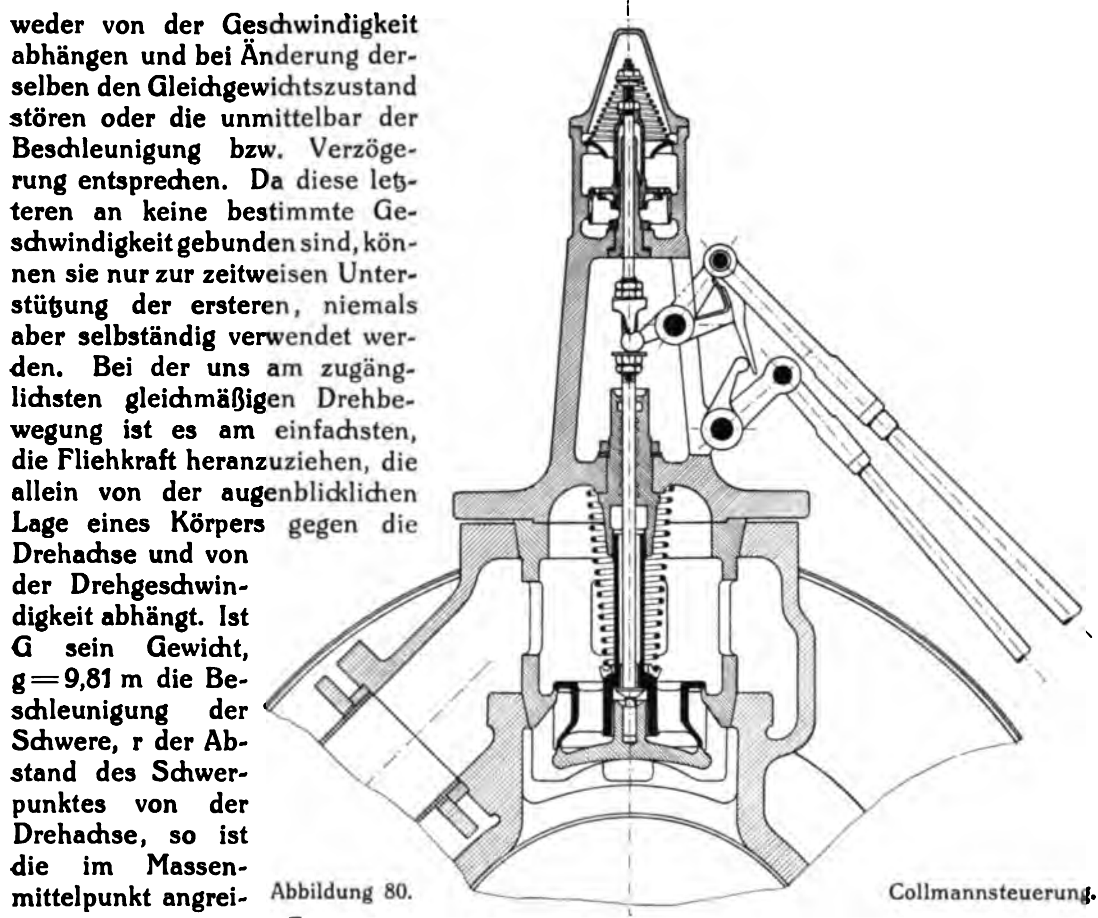


Abbildung 80. Collmannsteuerung.

fende Fliehkraft $F = \frac{G}{g} r\omega^2$. Ändert sich demnach ω um den kleinen Betrag $\triangle\omega$, so ändert sich F um $\triangle F = 2\frac{Gr}{g}\omega\triangle\omega$, also um so mehr, je größer ω ist. Es muß nun

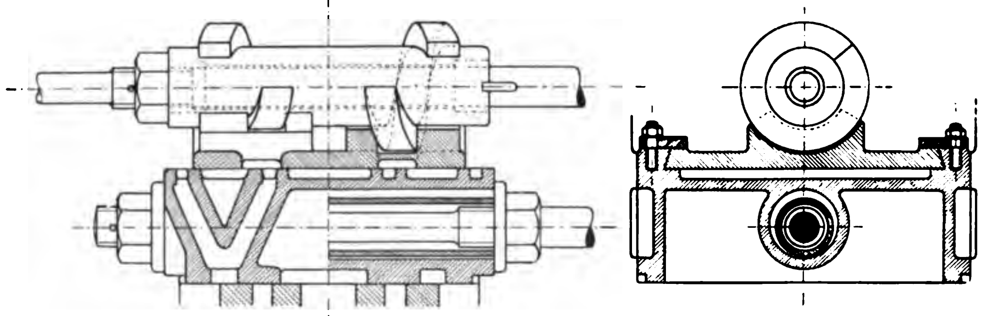
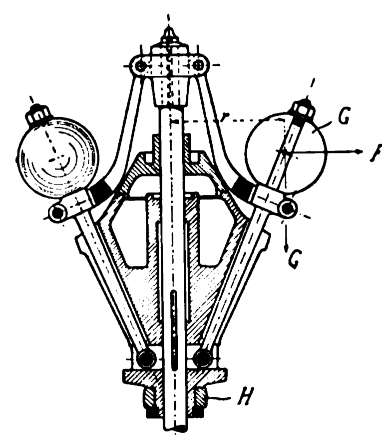


Abbildung 81. Guhrauersteuerung.

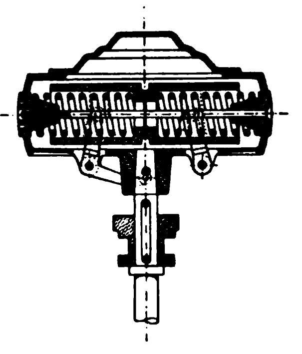
einerseits, um die Lage des Schwunggewichts G für eine gleichbleibende Drehzahl festzuhalten, der Kraft F das Gleichgewicht gehalten werden, anderseits muß die Bewegung von G auf das Steuergestänge übertragen werden. Das geschieht gewöhnlich

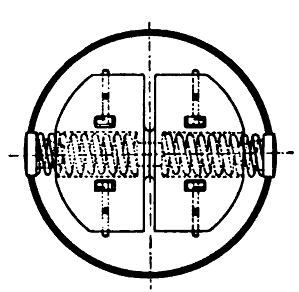
durch eine auf der Drehachse verschiebbare Hülse H, die mit den Schwungkörpern durch verschiedene Arten von Schubkurbelgetrieben verbunden sein kann (Abbildung 82) und durch Gewicht und Feder entsprechend belastet ist. Diese Belastung ist so zu wählen, daß für die Mittelstellung die gewünschte Drehzahl das Gleichgewicht herstellt, das Getriebe muß so konstruiert sein, daß für alle Lagen dann ein stabiles Gleichgewicht erzielt wird. Es muß nämlich jeder Muffenanlage eine mit r steigende Drehzahl entsprechen. Man nennt einen solchen Regler statisch. Es ist demnach im allgemeinen nicht möglich, bei verschiedenen Belastungen dieselbe Drehzahl einzuhalten, sondern bei steigender Belastung nimmt dieselbe etwas ab.



Abbild. 82. Gewichtsregler (Proell).

Abbildung 82 zeigt die Ausführung eines Gewichtsreglers, Abbildung 83 die eines Federreglers (Hartung); die hier verwendete Querfeder fängt die Fliehkräfte der Schwungkörper unmittelbar auf, so daß die zur Übertragung der Bewegung dienenden Zapfen nur mehr wenig belastet sind und die Empfindlichkeit daher sehr groß ist. Federn haben vor Gewichtsbelastung den großen Vorzug, daß sie bei kleiner Massenwirkung große Kräfte abgeben können. Soll während des Ganges die Drehzahl der Maschine verändert werden, so muß unter Beibehaltung der Stabilität die Belastung der Hülse einstellbar sein. Abbildung 84 gibt ein Beispiel nach Tolle: die größere oder kleinere Spannung der Feder f ändert die mittlere Drehzahl. Diese Tourenverstellung ist in manchen Betrieben (z. B. Papierfabriken, Walzwerken) notwendig, besonders aber bei elektrischen Zentralen mit Wechsel- oder Drehstrombetrieb zum Parallelschalten zweier Generatoren, von denen der eine belastet ist, also eine kleinere Umlaufzahl hat als der noch unbelastete. Auch beim Laden von Akkumulatoren ist eine Änderung der Drehzahl notwendig.




Abbildung 83. Federregler (Hartung).

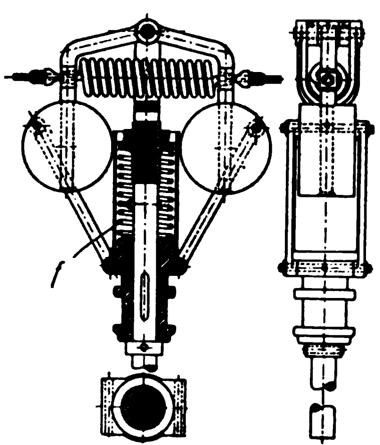


Abbildung 84. Federregler mit Tourenverstellung (Tolle).

Auf gleichen Grundlagen wie der sogenannte Pendelregler beruht auch der Achsenregler; ein Beispiel ist in Abbildung 85 dargestellt. Der Vorteil desselben besteht darin, daß alle Zapfen parallel der Drehachse liegen und daher bei Geschwindigkeitsänderungen keine durch Massenwirkungen hervorgerufenen Klemmungen eintreten. Im Gegenteil kann man hier diese Trägheitskräfte unmittelbar und ohne verwickelte Übertragungen zur Verstärkung der Reglerwirkung heranziehen, ja sogar ihnen die hauptsächliche Funktion zuweisen (Inertie-Regulatoren).

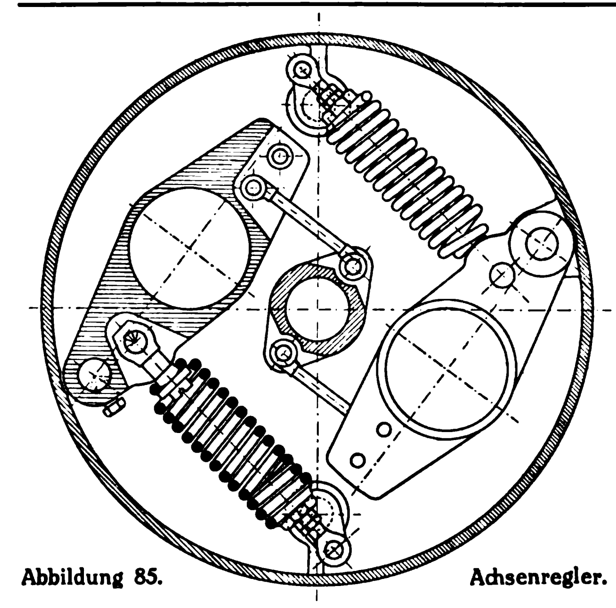


Abbildung 85. Achsenregler.

Hier erkennt man sogleich die unmittelbare, zwangläufige Übertragung der Bewegung der Schwungkörper auf den Steuerungsmechanismus. Auch die Hülsenbewegung bei Pendelreglern wird mittels Hebels und Zugstangen unmittelbar auf die betreffenden Teile der äußeren Steuerung übertragen. Man nennt diese Regulierung die direkte, sie erfordert entsprechend große Verstellkräfte an der Reglerhülse und damit eine gewisse Unempfindlichkeit. Über die indirekte Regelung haben wir später bei Besprechung der Dampfturbinen zu berichten.

Bei kleineren Maschinen, wo die Wirtschaftlichkeit keine so große Rolle spielt, ferner wo man zu Heizzwecken Dampf benötigt, wie in vielen Betrieben (Papierfabriken, Zuckerfabriken, chemischen Fabriken und vielen anderen) läßt man den Abdampf aus dem Zylinder ins Freie bzw. in die Heizkörper ausströmen, wo

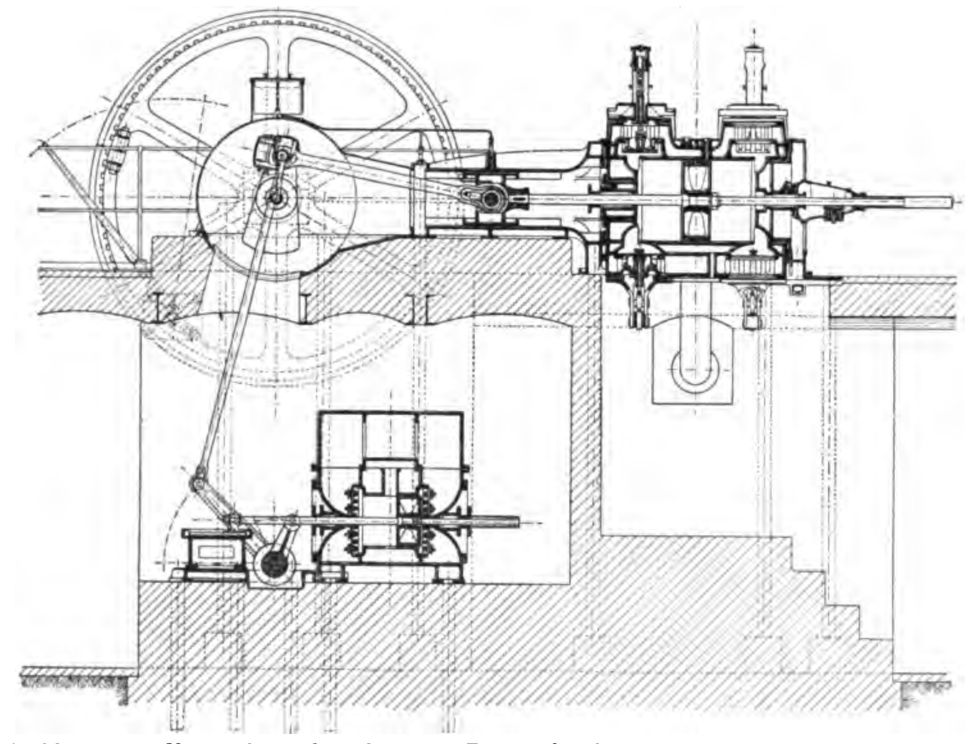


Abbildung 86a. Verbunddampfmaschine mit Einspritzkondensation (Prager Maschinenbau-A.-G).

er den Rest seines Wärmeinhalts nutzbringend in vorteilhafter Weise abgibt. Unserem Grundsatze nach ist aber dabei die Ausnutzung der Wärmeenergie in der Maschine selbst,

also zur Erzeugung von mechanischer Arbeit, noch recht mangelhaft; denn der abströmende Wärmeträger soll ja möglichst geringen Energieinhalt übrig haben. Im Abschnitt IIIa ist dargelegt worden, daß derselbe nicht nur von der Temperatur allein abhängt, sondern auch vom Aggregatzustand, und zwar in sehr bedeutendem Maße. Die untere Temperaturgrenze, d. i. jene der Umgebung, zu vermindern, ist uns nun ohne neuen Arbeitsaufwand unmöglich, wir werden demnach trachten, den Dampf vor dem Abfluß in flüssigen Zustand zu bringen, wodurch die entsprechende latente Wärmemenge gewonnen wird. Kühlt man nämlich den aus dem letzten Dampfzylinder kommenden Dampf durch Einspritzung von zerstäubtem Wasser oder an gekühlten Oberflächen ab, so kondensiert er unter Abnahme des Dampfdruckes, und der Gegendruck in der Maschine wird sehr gering, die Leistung derselben demnach bedeutend vermehrt, ohne daß die erforderliche Dampfmenge wächst. Man gewinnt also bei gleicher Leistung am Dampfverbrauch und gleichzeitig an den Abmessungen der Dampfzylinder. Das Kondenswasser sowie die stets in geringer Menge vorhandene Luft müssen mit Hilfe von Luft- und Kondensatpumpen fortgeschafft werden, nachdem ihre Pressung wieder auf Atmosphärendruck gebracht ist. Bei Einspritzkondensationsanlagen geschieht dies meist gemeinsam mit der Abführung des Einspritzwassers, manchmal werden aber auch hier Warmwasser- und Luftpumpen gesondert ausgeführt. Bei Oberflächenkondensation, wo die Wärme des zu kondensierenden Dampfes durch Rohrwände an das Kühlwasser übergeht, bleiben Dampf, Luft und Kondensat vom Kühlwasser getrennt, man braucht also jedenfalls eine besondere Kühlwasserpumpe. Jedoch gewinnt man dabei im Kondensat ein gutes, vorgewärmtes Speisewasser, wenn der Dampf vor Eintritt in den Kondensator von Öl befreit wird. Oberflächenkondensation muß stets gewählt werden, wenn als Kühlwasser nur salzhaltiges Wasser (Meerwasser) zur Verfügung steht.

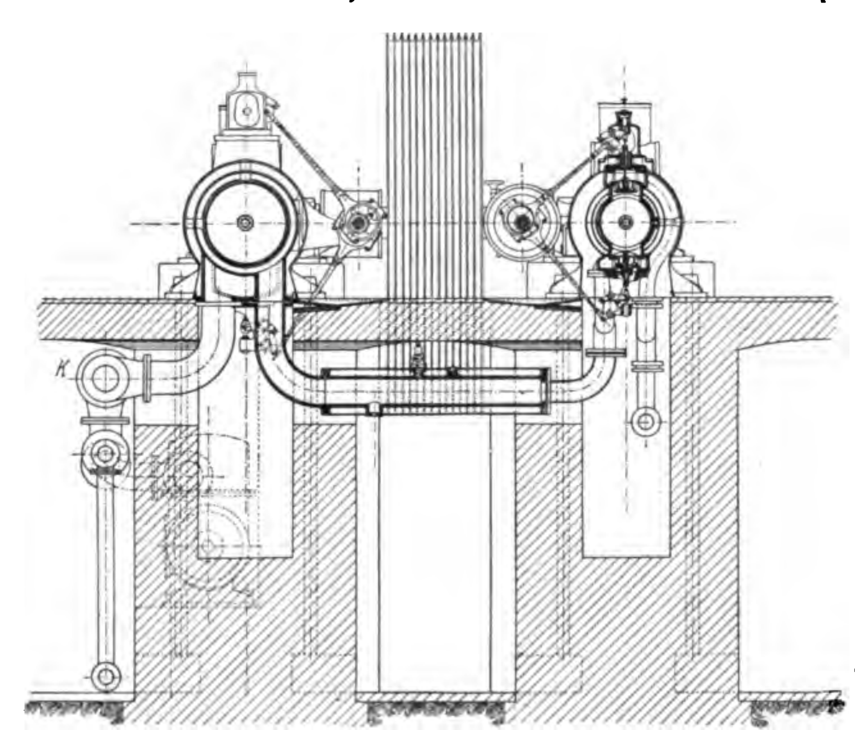


Abbildung 86b. Verbunddampfmaschine mit Einspritzkondensation.

Wenn nun mehrere Dampfmotoren in einer Anlage arbeiten, kann auch für alle gemeinsam eine sogenannte Zentralkondensation gebaut werden. Für Kolbendampfmaschinen ist etwa ein Vakuum von 80 bis 85 v. H. am vorteilhaftesten. Größere Luftleere muß durch teure Anlagen erkauft werden, während ihr Vorteil im Dampfzylinder nicht mehr zur entsprechenden Geltung kommt.

Die Einspritz- oder Mischkondensation kann entweder im Gleich- oder Gegenstrom erfolgen. Im ersteren Falle gelangt der Dampf aus dem Dampfzylinder in ein erweitertes Rohr, den Kondensator, wo ihm sogleich das durch ein besonderes Ventil geregelte Kühlwasser unter möglichst feiner Verteilung zugeführt wird, während am anderen Ende das Kondensat meist gemeinsam mit der durch Undichtheiten und mit dem Speise- und Injektionswasser zugeführten Luft durch die Naßluftpumpe abgesaugt wird. Abbildung 86 u. 87 zeigen derartige Anlagen. Der Antrieb der Luftpumpe bei Einzelkondensation erfolgt hier meist entweder unmittelbar von einer Verlängerung des Kurbelzapfens aus mittels Hebels und Zugstange oder auch von der durch den hinteren Zylinderdeckel hindurchgehenden Kolbenstange aus. Die Luftpumpe kann, wie die Abbildungen zeigen, stehend oder liegend, einfach- oder doppeltwirkend ausgeführt sein. Ihre Konstruktion ist sehr verschiedenartig; bei liegenden Luftpumpen werden meist volle, bei stehenden häufig auch Ventilkolben verwendet. Als Ventile dienen Gummiklappen oder leichte Metallventile, die durch Federn belastet sind; die Saugventile werden manchmal durch Saugschlitze ersetzt, die vom Kolben gesteuert werden (Abbildung 86a).

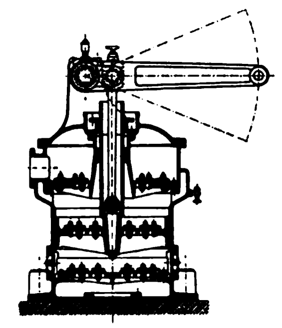


Abbildung 87. Stehende Luftpumpe mit Ventilkolben.

Die Berechnung der Mischkondensation mit Gleichstrom erfordert zuerst die Bestimmung der erforderlichen Kühlwassermenge, die sich etwa 30 bis 35 mal so groß als die zu kondensierende Dampfmenge ergibt. Die abzusaugende Luftmenge hängt von der Ausführung und der Art des Einspritzwassers ab. Letzteres enthält etwa in einem Liter 0,02 l Luft, aber die durch Undichtheit eindringende Luft hängt insbesondere von der Güte der Stopfbüchsen- und Rohrdichtung und von der Länge der Dampfauspuffleitung und der Injektionsleitung ab. Für Einzelkondensation kann man etwa diese Luftmenge 1,8 mal der verbrauchten Dampfmenge setzen.

Ist daher D die in der Dampfmaschine arbeitende stündliche Dampfmenge in kg, W die entsprechende Kühlwassermenge, so ist die abzuführende Luftmenge $L = 0{,}02\,W + 1{,}8\,D$ in Litern, oder mit $W = 30\,D$; $L = 2{,}4\,D$, wobei das Luftvolumen auf atmosphärischen Druck bezogen ist. Das stündlich vom Pumpenkolben zu durchlaufende Deplacement beträgt etwa 100 bis 120 D. Man rechnet gewöhnlich kurz mit 2 D pro Minute. Wie Abbildung 86 zeigt, ist hier der Kondensator K ein einfaches Gefäß, das am besten unterhalb des Niederdruckzylinders angebracht wird, damit sich nirgend Wasser ansammeln kann.

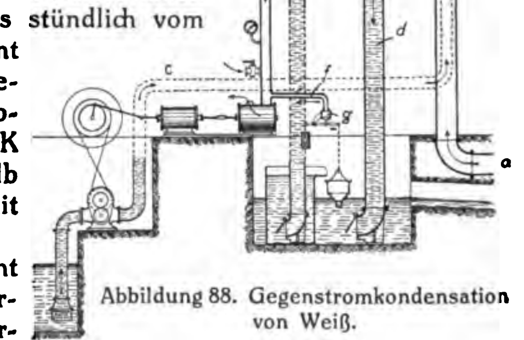


Abbildung 88. Gegenstromkondensation von Weiß.

Die Gegenstrom-Mischkondensation besteht darin, daß Dampf und Kühlwasser nicht an derselben Stelle eintreten, sondern gegeneinandergeführt werden, wodurch erzielt wird, daß die abzusaugende Luft, da sie mit dem kältesten Einspritzwasser in Berührung steht, möglichst niedrige Temperatur aufweist. Abbildung 88 zeigt eine solche Anlage. Der Dampf gelangt durch das Rohr a in den Kondensator b, dem durch das Rohr c Kühlwasser zugeführt wird. Hier fließt es über

eine Reihe von Blechschirmen dem Dampfstrom entgegen, kondensiert den Dampf, und das Kondens- und Kühlwasser wird gemeinsam durch ein Abfallrohr von 10 m Höhe abgeleitet. Die Luft wird von oben her durch eine trockene Luftpumpe abgesaugt.

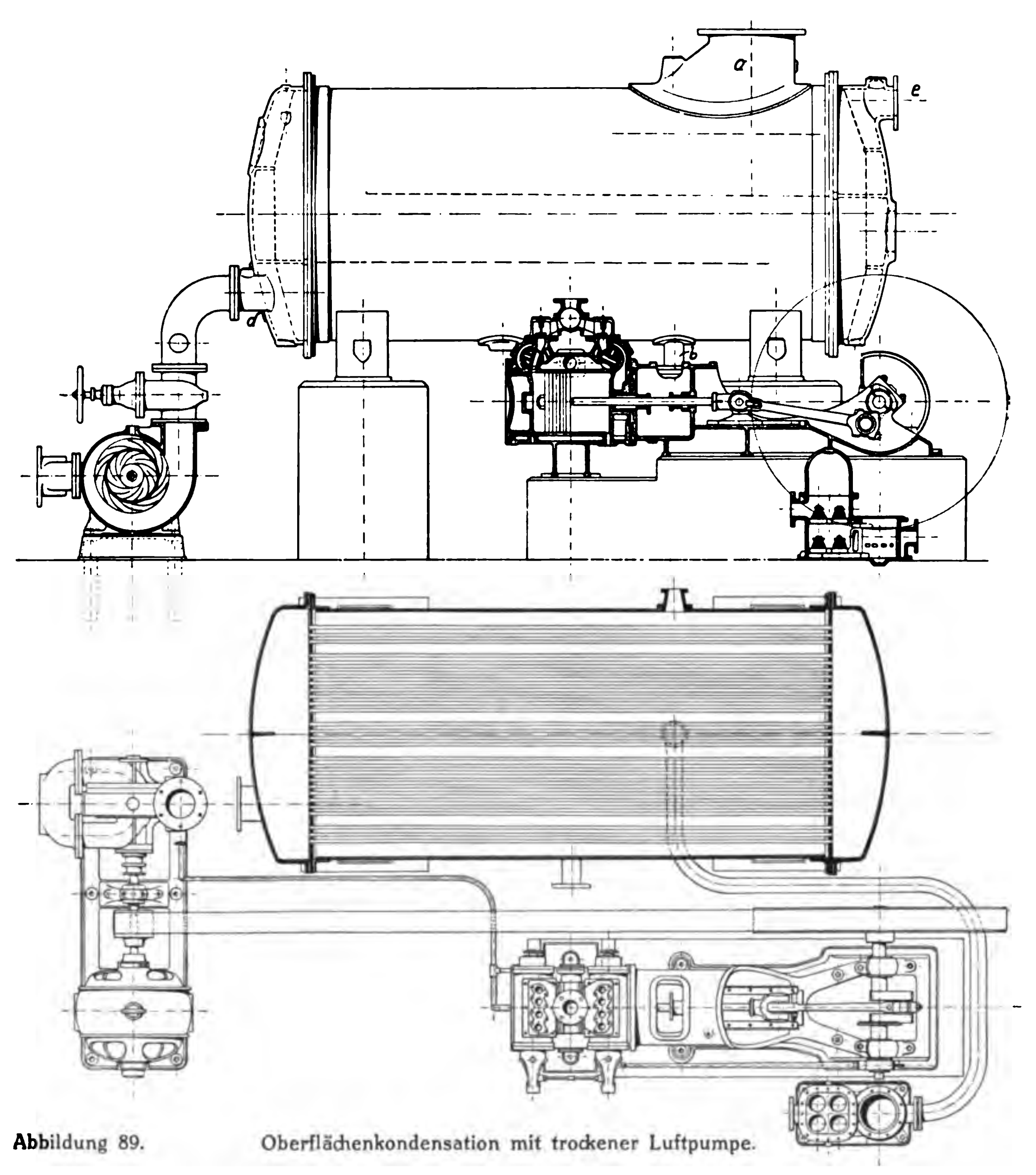


Abbildung 89. Oberflächenkondensation mit trockener Luftpumpe.

Die Klappe am unteren Ende von d hat den Zweck, ein Rückströmen von Wasser zu verhindern, so daß ein Ansteigen bis nahe an das Dampfrohr a nicht möglich ist. Der Raum e dient als Wasserabscheider, damit die Luft nicht zu naß in die Luftpumpe gelangt, das Rohr f dient unter Mitwirkung des Ventils g dazu, zu verhin-

dern, daß die Luftpumpe zuviel Luft absaugt und sich der ganze Kondensator mit Wasser füllt.

Ganz anders wirkt die Oberflächenkondensation. Hier wird meist in geschlossenen Gefäßen zwischen gebohrten Rohrplatten eine Anzahl von dünnwandigen Rohren angebracht, durch die das Kühlwasser strömt, während sie außen von dem zu kondensierenden Dampf umgeben sind. Abbildung 89 zeigt einen derartigen Kondensator; der Dampf wird bei a zugeführt, durchströmt den Kondensatorraum unter möglichst intensiver Bestreichung aller Rohroberflächen meist in Schlangenwindungen, während das Kondensat bei b von einer Kondensatpumpe abgeleitet wird. Die Luft wird entweder von derselben Pumpe, besser aber von einer besonderen trockenen Luftpumpe an der kältesten Stelle c abgeführt. Die Zu- und Abführung des Kühlwassers liegt bei d und e, die Führung desselben geschieht möglichst nach dem Gegenstromprinzip. Die Kühlwassermenge beträgt bei Dampfmaschinen 40 bis 50, bei Dampfturbinen mit gutem Vakuum 50 bis 60 mal so viel wie die Dampfmenge. Die Oberfläche der Kühlrohre wird im Mittel 0,025 D gemacht, bei Dampfturbinen oft 0,04 D.

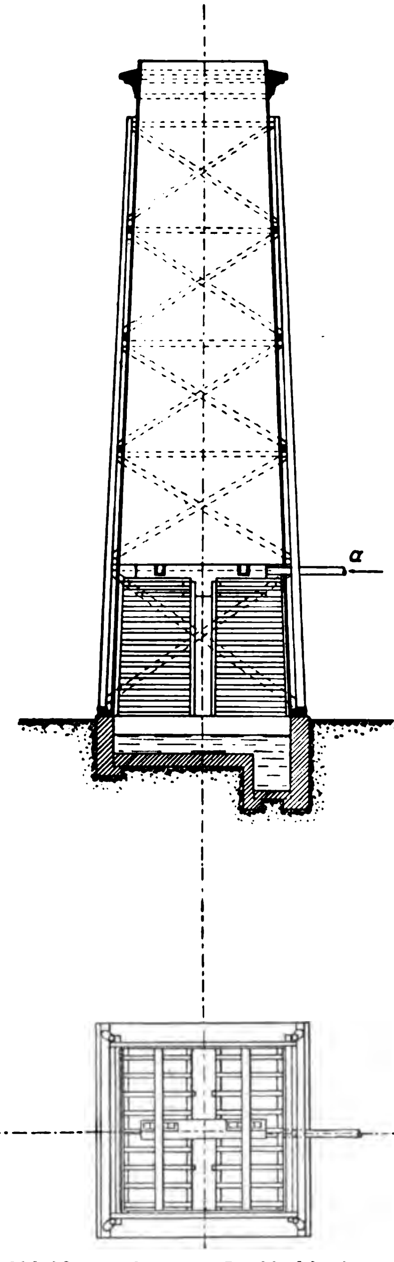


Abbildung 90. Rückkühlanlage.

Wo Maschinen mit Kondensation versehen sind, aber auch Heizdampf gebraucht wird, kann dieser vorteilhaft aus dem Aufnehmer zwischen Hoch- und Niederdruckzylinder entnommen werden.

Insbesondere bei Zentralkondensationen, aber auch bei Einzelanlagen, ist es manchmal schwierig, genügende Mengen von Kühlwasser zu beschaffen. Man verwendet dann sogenannte Rückkühlanlagen, die das erwärmte Wasser in feinverteiltem Zustande mit vorüberstreichender Luft in Berührung bringen. Teils durch Wärmemitteilung, teils durch Verdunstung des Wassers wird dabei diesem so viel Wärme entzogen, daß es neuerdings als Kühlwasser Verwendung finden kann. Zumeist erfolgt dieser Vorgang in Kühltürmen oder Kaminkühlern (Abbildung 90). Das Wasser wird bei a zugeführt, durch Rinnen verteilt, in schmale Wasserfäden gespalten und dann noch von eingebauten Latten verspritzt. Die Luft wird erwärmt und strömt nach oben hin durch den Kamin ab, einen künstlichen Luftzug erzeugend. Das abgekühlte Wasser sammelt sich in einem Bassin und wird von da wieder der Kondensationsanlage durch Pumpen zugeführt.

Abbildung 91 zeigt die Anlage einer Dampfmaschine für einen Fabrikbetrieb, Abbildung 92 für eine elektrische Zentrale. Von Dampfmaschinen für besondere Zwecke sind die Fördermaschinen für Bergwerke und die Walzenzugsmaschinen für Hütten-

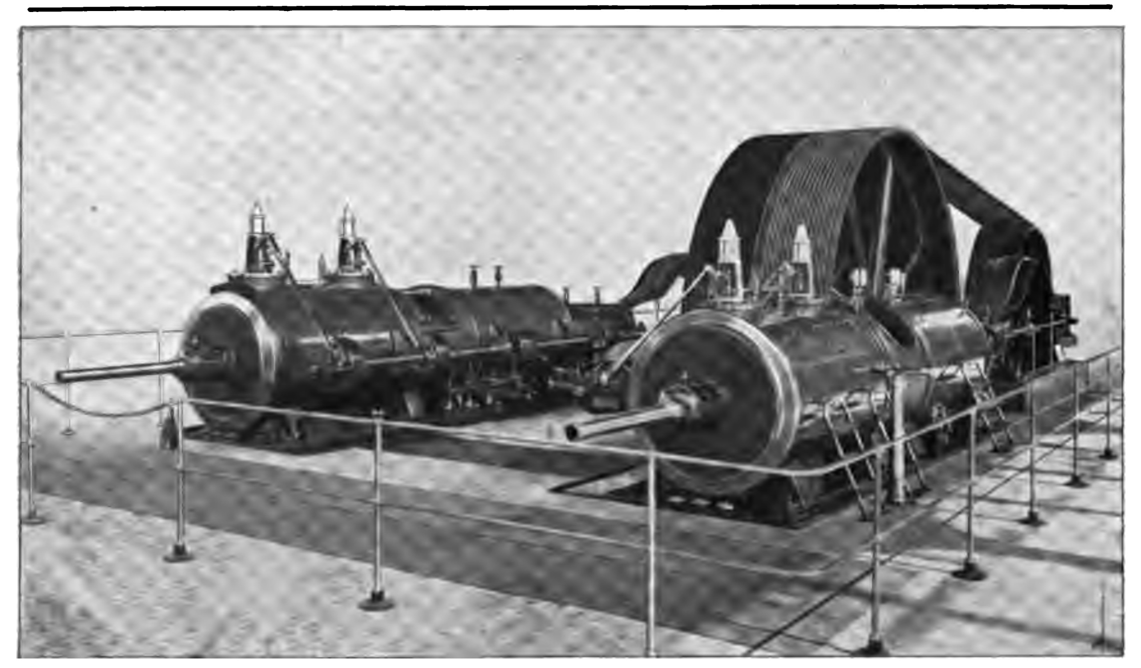


Abbildung 91. Dreifachexpansionsdampfmaschine (Collmann) für Fabriksantrieb.

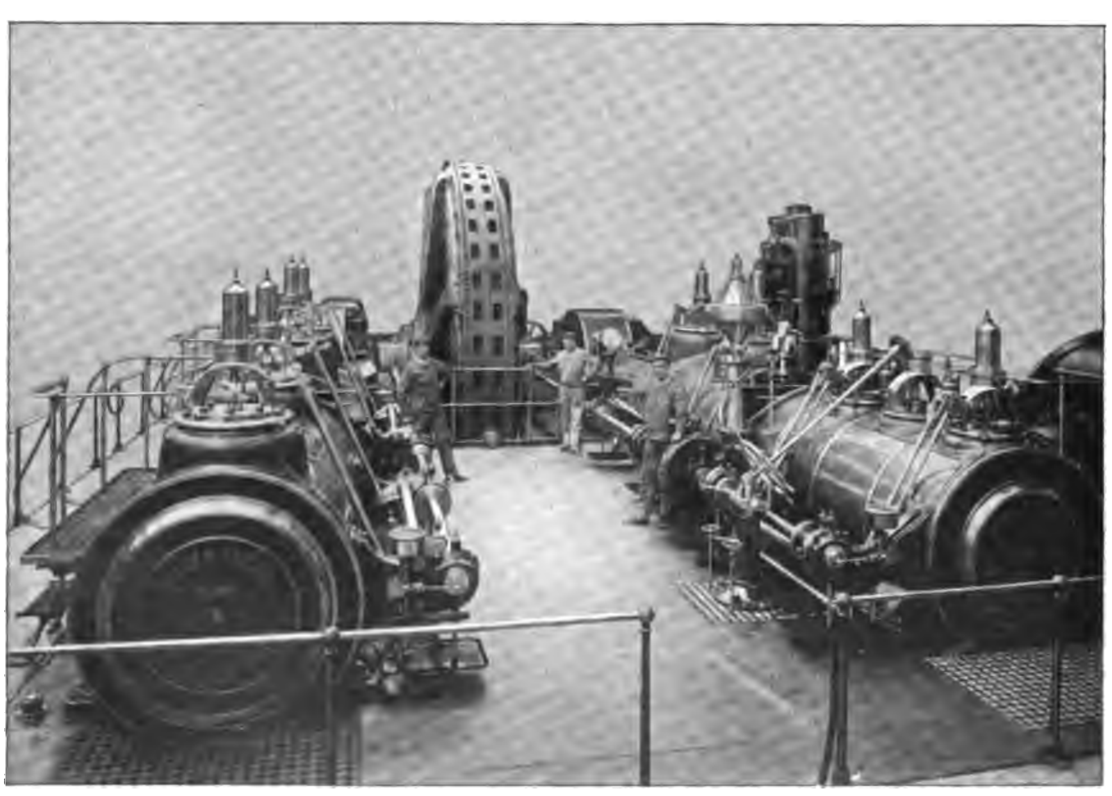


Abbildung 92. Dreifachexpansionsdampfmaschine (Sulzer) für Dynamoantrieb.

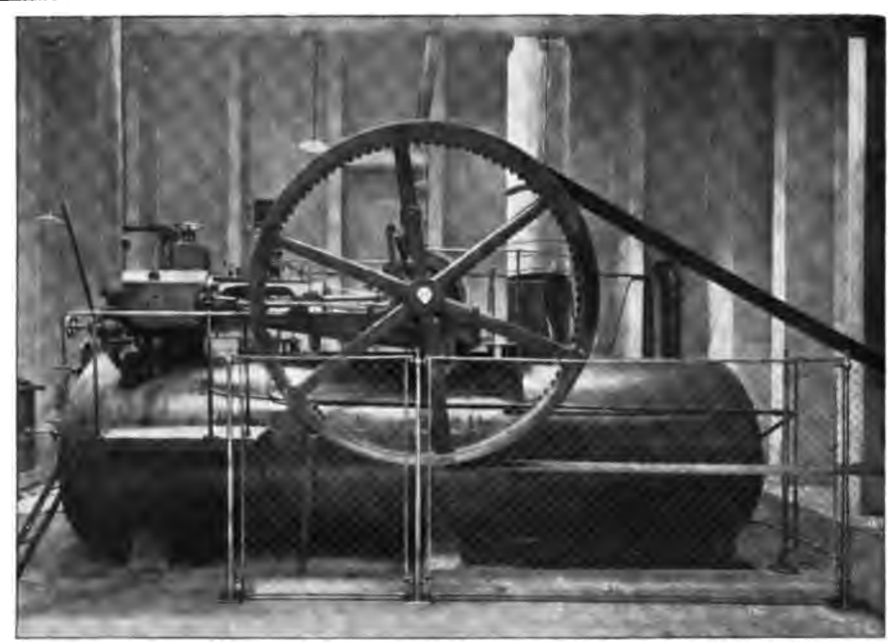


Abbildung 93. Lokomobil.

werke zu erwähnen, ferner die Lokomotiven und Schiffsmaschinen, die in den betreffenden Abschnitten behandelt erscheinen. Abbildung 93 zeigt das Bild eines Lokomobils.

3. DAMPFTURBINEN*

Während in der Dampfmaschine die Umwandlung der inneren Energie durch Druck auf die Kolbenflächen stattfindet, geschieht sie bei Dampfturbinen dadurch, daß wenigstens ein Teil der Energie des Dampfes vor Eintritt in die eigentlich arbeitenden Teile der Maschine, d. s. die Laufräder, schon in kinetische Energie, d. i. Geschwindigkeitsenergie, verwandelt wird. Die Geschwindigkeit des Dampfes bildet sich beim Ausströmen desselben in einen Raum von niedrigerer Dampfspannung, und nachdem hierbei kein wesentlicher Betrag von Wärme zu- oder abgeführt wird, kann man die gleichzeitig stattfindende Ausdehnung des Dampfes als „adiabatisch“ bezeichnen (vgl. Abschn. IIIa). Auch hier geht das Bestreben dahin, dem Dampf möglichst viel von der ihm innewohnenden Energie unter Arbeitsleistung zu entziehen, es soll also auch hier der abströmende Dampf möglichst wenig Druck und Geschwindigkeit besitzen. Zwischen Anfangs- und Endzustand des Dampfes liegt ein Energieinhalt, der dem bei Dampfmaschinen dargestellten natürlich gleich ist. Man kann ihn deshalb auch ebenso im Flächeninhalt eines Diagramms ausdrücken, dessen Abszissen die Volumina und dessen Ordinaten die zugehörigen Drücke messen (Abbild. 94). Es ist schon im Abschnitt IIIa gezeigt worden, daß dieser Energieinhalt bis zu einem Druck im Ausströmraum von 0,5774 desjenigen im

Abbildung 94. Dampfdiagramm einer Dampfturbine.

* Die meisten Abbildungen sind dem Aufsatz „Neuere Konstruktionen von Dampfturbinen“ in der „Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure“, Jahrg. 1910, entnommen.

Frischdampfraum durch einfache Öffnungen mit abgerundetem Einlauf nahezu voll ausgenutzt werden kann, daß aber bei kleineren Drücken in jenem Raum hierzu die sogenannten erweiterten Düsen von de Laval angewendet werden müssen. Rechnet man nämlich aus dem verfügbaren Energieinhalt i bei adiabatischer Expansion durch Gleichsetzen mit dem Ausdruck für die lebendige Kraft die größte erreichbare Geschwindigkeit aus, wenn im Dampfraum die Zuströmgeschwindigkeit vernachlässigt werden kann, so ergibt sich aus $i = \frac{1}{428} \frac{c^2}{2g}$ die Geschwindigkeit $c = \sqrt{2g \frac{k}{k-1} p_0 v_0 \left(1 - \frac{p}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}}$, worin p_0 und v_0 Druck und spezifisches Volumen im Dampfraum, p den Druck im Ausströmraum, g die Beschleunigung der Schwere und k für trocken gesättigten Dampf den Wert 1,135 bedeuten. Nachdem ferner das spezifische Volumen $v = F.c$ ist, mit F als Durchströmquerschnitt für 1 kg Dampf, so ergibt sich auch $F = \frac{v}{c}$, wobei sich zeigt, daß der kleinste Querschnitt bei $p = 0{,}5774 p_0$ auftritt, während er sich bei Verminderung von p in gesetzmäßiger Weise vergrößert, woraus sich die theoretisch richtige Gestalt der Düse ergibt.

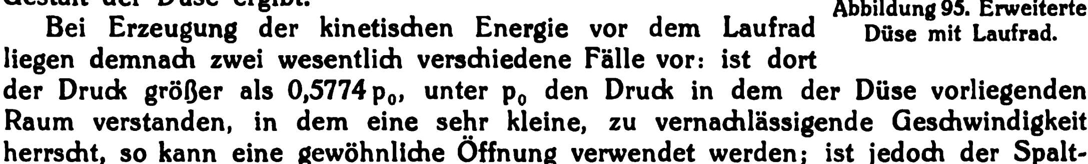


Abbildung 95. Erweiterte Düse mit Laufrad.

Bei Erzeugung der kinetischen Energie vor dem Laufrad liegen demnach zwei wesentlich verschiedene Fälle vor: ist dort der Druck größer als $0{,}5774 p_0$, unter p_0 den Druck in dem der Düse vorliegenden Raum verstanden, in dem eine sehr kleine, zu vernachlässigende Geschwindigkeit herrscht, so kann eine gewöhnliche Öffnung verwendet werden; ist jedoch der Spaltdruck kleiner als jener Wert, so muß eine erweiterte Düse angeordnet werden.

Das durch einen engsten Querschnitt F_x strömende Dampfgewicht ergibt sich aus $G = F_x \sqrt{2g \frac{k}{k+1} \frac{p_x}{p_0} \frac{p_0}{v_0}} \backsim 199\, F_x \sqrt{\frac{p_0}{v_0}}$ mit $p_x = 0{,}5774\, p_0$. Die Erweiterung der Düse wird stets kegelförmig ausgeführt, obwohl dies theoretisch nicht genau ist. Der Kegelwinkel ist gewöhnlich 10°.

Wir wissen nun, daß das größte Druckgefälle auch den günstigsten Nutzeffekt und damit die beste Energieausnutzung gibt. Die in einer erweiterten Düse dabei auftretenden Dampfgeschwindigkeiten sind aber derart groß, daß es schwierig ist, sie unmittelbar auf ein Laufrad zu übertragen (Abbildung 95), d. h. bis auf sehr kleine Werte zu vermindern, wie es unserem Grundsatz entsprechen würde. Nennen wir nämlich c_1 die Ein-, c_2 die Austrittsgeschwindigkeit aus dem Laufrad bei gleichbleibendem Druck, so ist die abgegebene Leistung gleich der Differenz der lebendigen Kräfte, also gleich $\frac{c_1^2 - c_2^2}{2g}$, wenn von Verlusten abgesehen wird.

Die Wirkungsweise eines solchen Gleichdruckrades besteht darin, daß durch Ablenkung, also Änderung der Richtung des Dampfstrahls, die lebendige Kraft an das Rad abgegeben wird. Ist z. B. u die Richtung und Größe der Umfangsgeschwindigkeit desselben, so muß der Dampfstrahl schräg dazu in das Rad eintreten, etwa in Richtung c_1 unter dem sogenannten Leitradaustrittwinkel α_1 (Abbild. 96). Ein Beobachter, der die Geschwindigkeit mitmachen würde, würde an den Dampfteilchen nur die sogenannte relative Eintrittsgeschwindigkeit bemerken, die die Resultierende aus

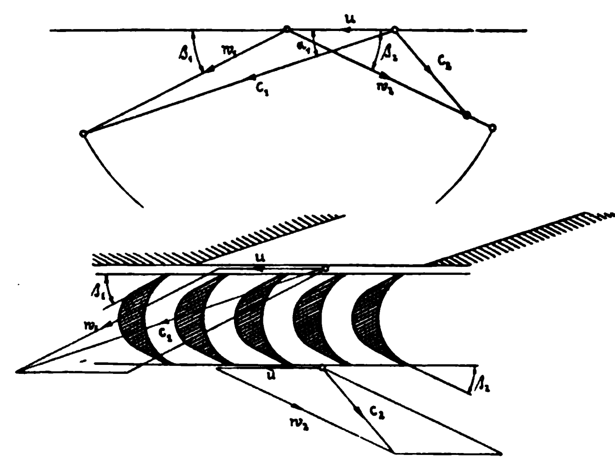


Abbildung 96. Geschwindigkeitsdiagramme einer einfachen Gleichdruckturbine.

c_1 und u ist. Da nun der Druck bei Durchströmen des Rades sich nicht ändern soll, bleibt die relative Geschwindigkeit, abgesehen von den sie etwas vermindernden Widerständen, gleich; da sie aber bei der gezeichneten Schaufelform die Richtung w_2 angenommen hat, ergibt sich durch Zusammensetzung von w_2 mit u die absolute Ausströmgeschwindigkeit c_2. Wir haben dabei stillschweigend die Schaufelform derart gewählt, daß beim Eintritt des Dampfes in dieselbe möglichst wenig Stoß eintritt, indem die Schaufel dort in der Richtung der relativen Eintrittsgeschwindigkeit liegt und dem relativen Strahl eine scharfe Kante gegenüberstellt. Wie man sogleich sieht, ist demnach die Umfangsgeschwindigkeit u nicht gleichgültig, die günstigste Ausnutzung ergibt sich etwa für $u \sim \frac{1}{2} c_1$, also mit Rücksicht auf die durch Fliehkräfte hervorgerufene Beanspruchung des Rades sehr hoch. Außerdem aber bedingt sie für kleinere Räder sehr hohe Umlaufzahlen, so daß man dort nach de Laval Zahnradübersetzung anwenden muß, um auch nur die höchsten im Betrieb vorkommenden Umdrehungszahlen der Dynamomaschinen von etwa 3000 in der Minute zu erreichen. Anderseits kann man hierzu auch sehr große Durchmesser wählen; da diese Art von Turbinen aber wenigstens für größere Leistungen kaum mehr Verwendung finden, wollen wir uns sogleich mit den Hilfsmitteln beschäftigen, die zur Verminderung der Umfangsgeschwindigkeit u führen sollen. Das erste ist die sogenannte Geschwindigkeitsabstufung. Zeichnet man nämlich für eine kleinere Umfangsgeschwindigkeit das Eintrittsdiagramm Abbildung 96, so ergibt sich für den Austritt eine zu hohe und gegen u zu sehr geneigte Geschwindigkeit. Führt man diese nun durch feste Umkehrschaufeln in die durch den Eintrittswinkel α_1 gegebene Richtung über und läßt den Dampfstrahl neuerdings auf ein Laufrad von gleicher Schaufelform wirken, so ergibt sich im Austrittsdiagramm desselben schon eine kleinere und günstiger gerichtete Austrittsgeschwindigkeit. In Abbildung 97

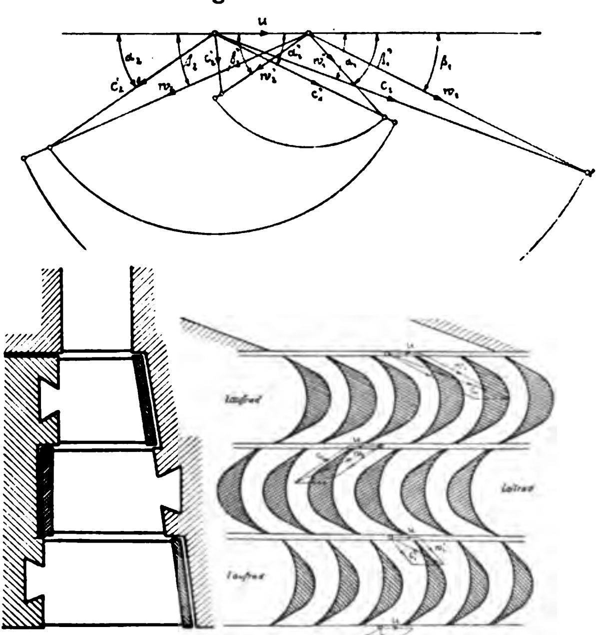


Abbildung 97. Geschwindigkeitsdiagramme einer Gleichdruckturbine mit einmaliger Geschwindigkeitsabstufung.

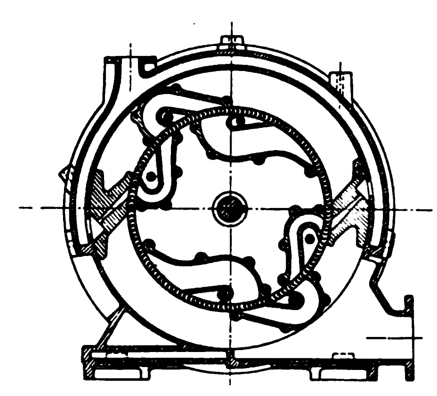


Abbildung 98. Gleichdruckrad mit mehrfacher Beaufschlagung (Elektra, Karlsruhe).

ist dieser Vorgang noch einmal wiederholt dargestellt. Die Schaufelreibung des Dampfstrahls vermindert dabei freilich den Nutzeffekt. Die festen Umführungsschaufeln können auch derart geformt sein, daß ein und dasselbe Laufrad wiederholt vom Dampfstrahl beaufschlagt wird (Abbild. 98). Eine wesentlich andere Art, die Umfangsgeschwindigkeit zu vermindern, ist die Druckabstufung. Die Dampfgeschwindigkeit wird um so geringer, je kleiner das Verhältnis $\frac{p_0}{p}$ ist; wenn man demnach das Druckgefälle in mehrere Teile teilt, indem man eine Reihe von Düsen und Laufrädern hintereinanderschaltet, so ergeben sich auch entsprechend kleinere Umfangsgeschwindigkeiten. Die Laufräder sitzen auf der gemeinsamen Welle, und die einzelnen Druckräume sind gegeneinander durch Zwischenböden getrennt und abgedichtet, in denen wieder am ganzen Umfang oder nur an einem Teil desselben die Düsen für die nächste Stufe angebracht sind. Wenn man diese Druckabstufung mit der Geschwindigkeitsabstufung vereinigt, ergibt sich die Turbine von Curtis, die in stehender Anordnung in Abbildung 99 dargestellt erscheint. Der Dampf strömt bei a in die ersten Düsen d_1 und von da auf das erste Laufrad r_1, das am Umfang nach dem Prinzip der Geschwindigkeitsabstufung zwei Reihen von Schaufeln trägt, die zwischen sich die im Gehäuse befestigten Umführungsschaufeln aufnehmen (vgl. Abbild. 121). Aus dem Raum, in dem das erste Laufrad sich bewegt, kommt der nur mehr mit geringer Geschwindigkeit austretende Dampf durch neue Düsen d_2 auf das zweite Laufrad r_2 und so fort, bis endlich der Dampf aus dem letzten Laufrad r_4 unmittelbar in den Kondensator strömt. Hier hat der Spurzapfen das Gewicht des rotierenden Teils der Turbine und der Dynamomaschine zu tragen, muß also sehr sorgfältig konstruiert und ge-

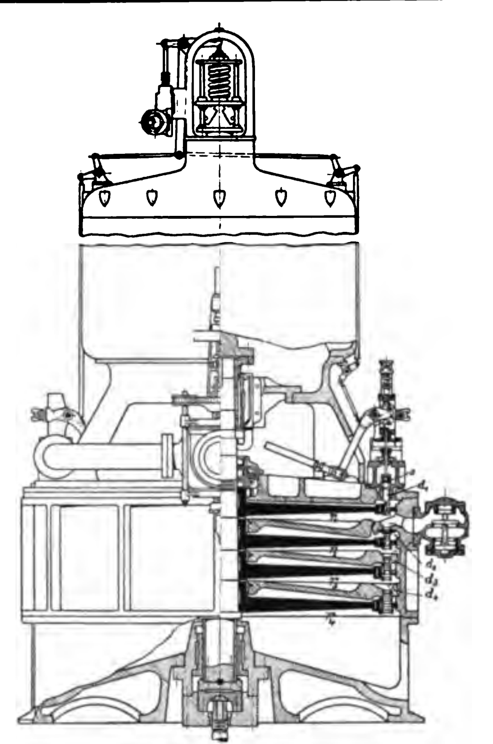


Abbildung 99. Stehende vierstufige Curtis-Turbine.

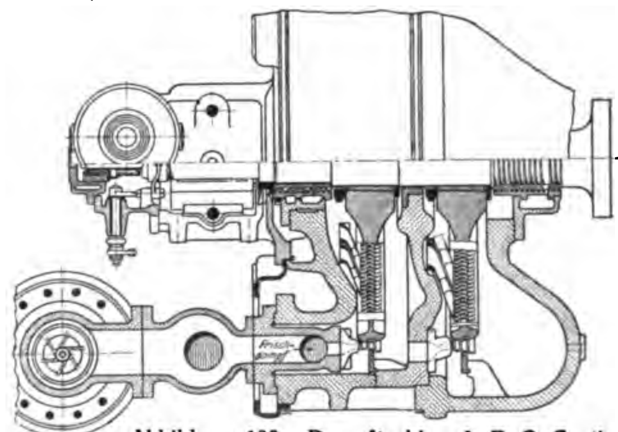


Abbildung 100. Dampfturbine A.-E.-G.-Curtis.

schmiert werden. Dies letztere geschieht mit Druckwasser oder Drucköl, das zwischen die Laufflächen gepreßt wird. Die Abdichtung der einzelnen Stufenräume in den zweiteiligen Zwischenböden geschieht durch sogenannte Labyrinthdichtung, indem Ringe mit eingedrehten Nuten eng an die Welle anschließen. Abbildung 100 zeigt eine derartige Ausführung der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin, die Abbildungen 101, 102, 103 die zugehörigen Düsen.





Abbildung 101, 102 u. 103. Düsen der Allg. Elektr.-Ges.

Verzichtet man auf die Geschwindigkeitsabstufung, so muß man, um entsprechende Umfangsgeschwindigkeiten zu erreichen, die Stufenzahl erhöhen. Man gelangt so zur Turbine von Rateau, die weiterhin von Zoelly und anderen ausgebildet worden ist. Wenn man die Anzahl der Stufen genügend groß macht, daß das Verhältnis $\frac{p_0}{p}$ für keine Stufe kleiner als 0,5774 wird, so kann man auf die erweiterte Düse verzichten und einfache Leitschaufeln verwenden, die meist aus Stahlblech hergestellt und in die Gehäuse und Zwischenböden eingesetzt oder eingegossen werden. Abbildung 104 zeigt eine Rateauturbine im Längenschnitt. Die gegen die Mitte zu verstärkte Welle trägt hier 16 Laufräder, die durch zweiteilige und gegen die Naben der Laufräder mit Labyrinthen abgedichtete Zwischenböden voneinander getrennt sind. In jedem Zwischenboden befinden sich Leitkanäle, bei den ersten Stufen nur auf einem Teil des Umfangs, mit Rücksicht auf das kleine Dampfvolumen (vgl. Abbildung 121).

Bei den bisher besprochenen Turbinenbauarten ist die Umsetzung der im Dampf enthaltenen Energie ausschließlich in der Düse bzw. im Leitapparat vor sich gegangen.

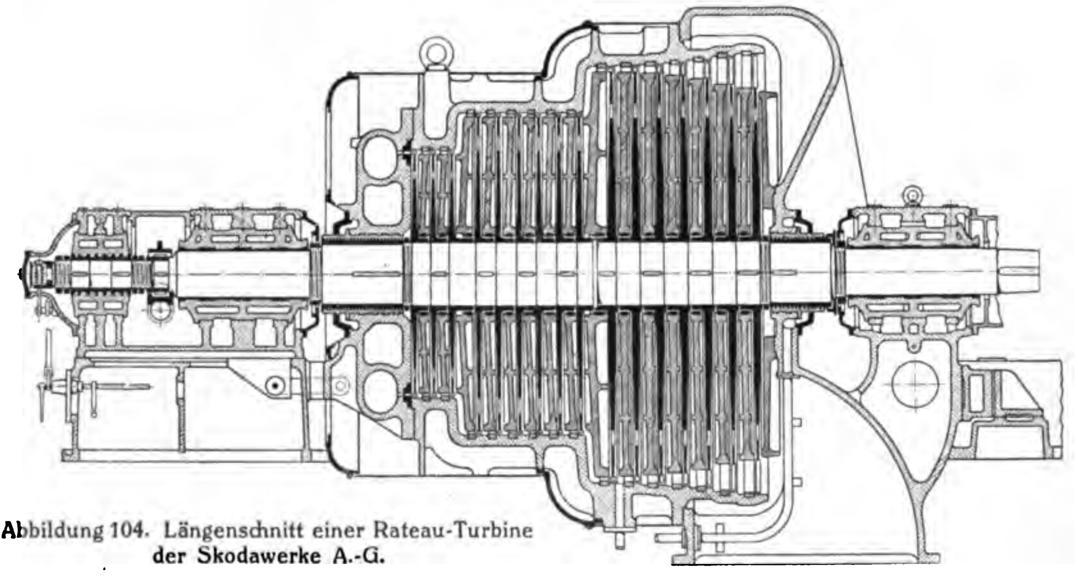


Abbildung 104. Längenschnitt einer Rateau-Turbine der Skodawerke A.-G.

Der auf das Laufrad treffende Dampf hat die volle, dem Druckunterschied einer Stufe entsprechende Geschwindigkeit, wie sie aus der in Abbildung 94 dargestellten Arbeits-

fähigkeit L hervorgeht, und zwar mit Hilfe der Gleichung $c = \sqrt{2g\frac{L}{m}}$, wenn m Stufen vorhanden sind. Die Wirksamkeit des Laufrades besteht nur darin, die relative Geschwindigkeit in ihrer Richtung zu verändern und dadurch die kinetische Energie aufzunehmen, während, abgesehen von der Einwirkung der Schaufelreibung, keine Änderung, keinesfalls eine Vergrößerung der relativen Dampfgeschwindigkeit eintritt. Läßt man nun aber unter Voraussetzung voller Erfüllung der Laufradkanäle durch den Dampfstrahl, also auch voller Beaufschlagung am ganzen Radumfang, den Querschnitt dieser Kanäle gegen den Austritt hin kleiner werden, so muß die relative Dampfgeschwindigkeit entsprechend wachsen und wie beim Ausströmen aus einer Düse auch im Laufrad eine Expansion eintreten. Die Rückwirkung des ausströmenden Dampfes, die durch die Vergrößerung der relativen Dampfgeschwindigkeit im Laufrad entsteht, nennt man oft Reaktion und diese Turbinen Reaktionsturbinen. Da ferner infolge der genannten Expansion im Laufrad auf beiden Seiten desselben verschiedener Dampfdruck herrscht, heißen sie auch Überdruckturbinen und erleiden infolge dieses Überdrucks eine Achsialkraft in der Richtung der Dampfströmung; diese Kraft muß durch geeignete Vorrichtungen aufgenommen werden.

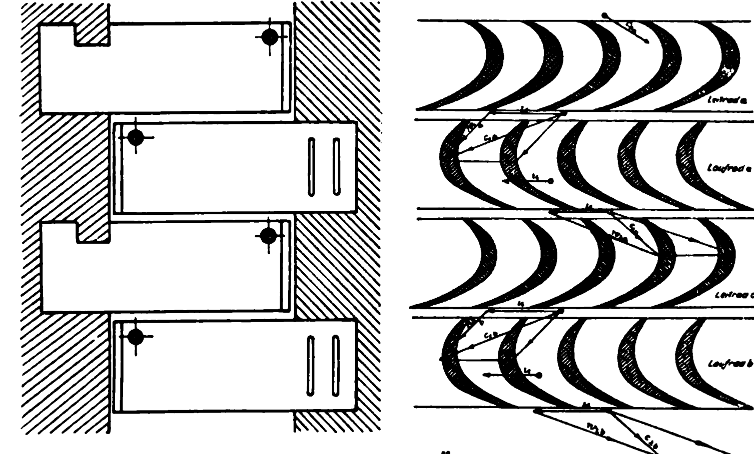


Abbildung 105. Verschaufelung einer Überdruckturbine.

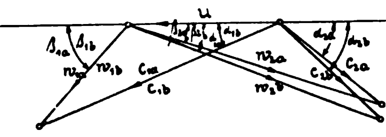


Abbildung 106. Geschwindigkeitsdiagramm einer Überdruckturbine.

Eine solche Überdruckturbine bedarf einer viel größeren Stufenzahl als eine Gleichdruckturbine. Die Laufradschaufeln sind auf einer Trommel angebracht und nehmen zwischen sich die im zweiteiligen Gehäuse befestigten Leitschaufeln auf (Abbild. 105). Bei den verhältnismäßig kleinen Druckstufen werden die Undichtheitsverluste mäßig, freilich ist es notwendig, insbesondere bei den Hochdruckstufen möglichst kleine Spielräume zwischen Trommel und Gehäuse anzuordnen, obwohl gerade hier die Gefahr des Streifens am größten ist. Diese Turbinenbauart hat neben der von de Laval bahnbrechend gewirkt, welches Verdienst Parsons gebührt. Insbesondere war er der erste, dem es gelungen ist, größere Leistungen durch Dampfturbinen zu erzeugen. Das Geschwindigkeitsdiagramm einer solchen Parsons-Turbine ist in Abbildung 106 dargestellt, während Abbildung 107 eine Ausführung von Brown, Boveri & Ko. in Baden (Schweiz) zeigt. Sehr große derartige Turbinen zeigen den Hoch- und Niederdruckteil getrennt (Abbild. 108).

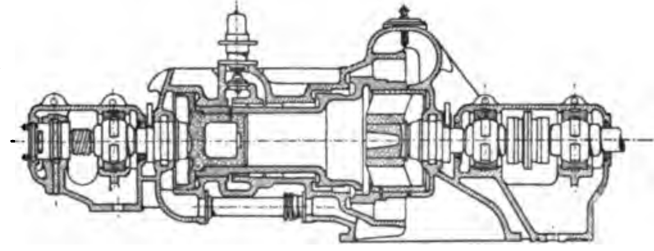


Abbildung 107. Dampfturbine von Brown, Boveri & Ko.

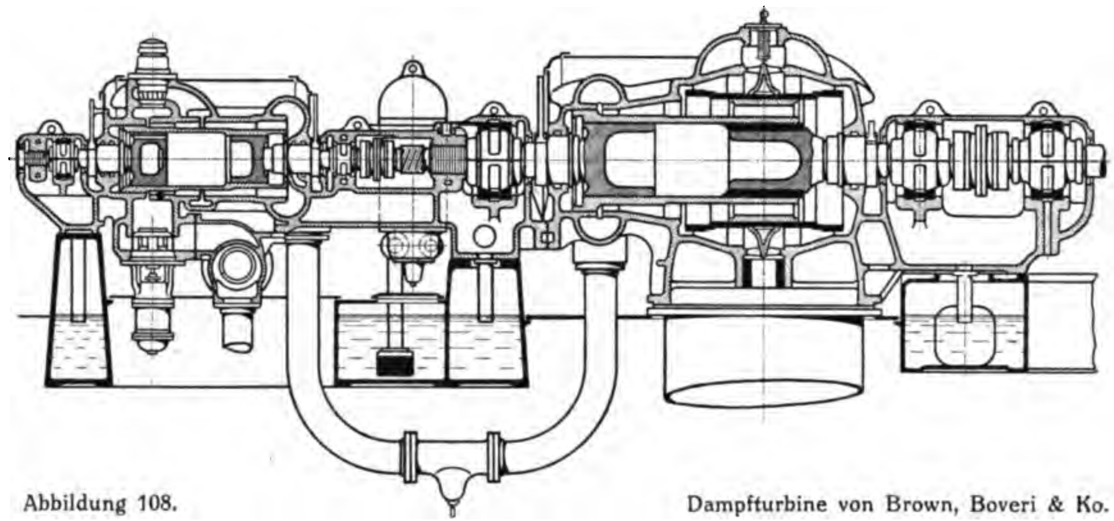


Abbildung 108. Dampfturbine von Brown, Boveri & Ko.

Die Aufnahme des achsial gerichteten Druckes geschieht hier durch Entlastungskolben (vgl. Abbild. 127), die fest mit der Trommelwelle verbunden sind und außen am Gehäuse durch Labyrinthe abdichten. Von innen wirkt der Dampfdruck der betreffenden Stufe, von außen jener der nächsten Abteilung auf diese Kolben, so daß ein Überdruck bleibt, der der Dampfströmung entgegengesetzt gerichtet ist. Außerdem sind stets Kammlager an der Welle vorhanden.

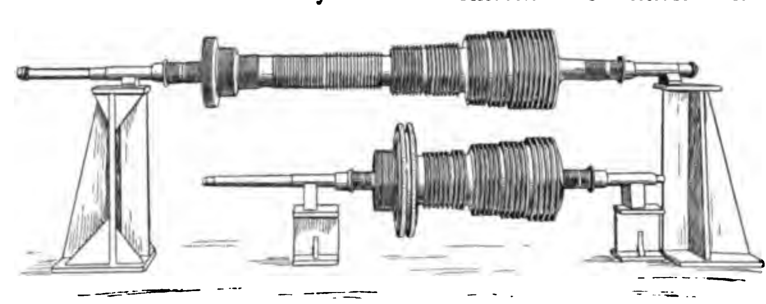


Abbildung 109. Oben: Trommel einer Überdruckturbine. Unten: Trommel einer kombinierten Turbine.

Die früher erwähnte Gefahr des Anstreifens der Schaufeln an Gehäuse oder Trommel, insbesondere am Hochdruckende der Turbine, wird noch wesentlich durch unvermeidliche Formänderungen von Trommel und Gehäuse bei hohen Temperaturen verstärkt. Außerdem wird die Länge der Trommelwelle infolge der großen Stufen-

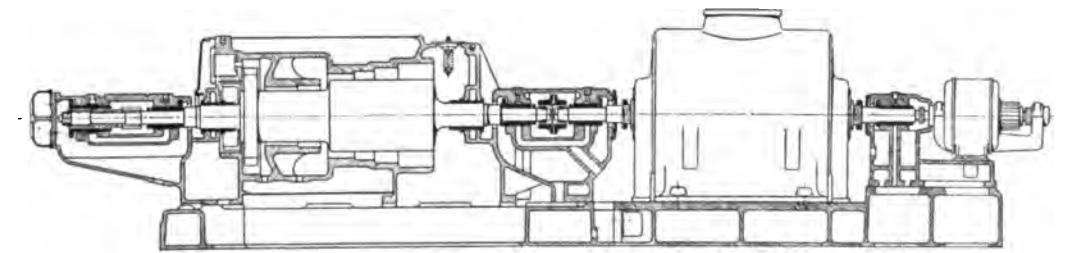


Abbildung 110. Dampfturbine gemischter Bauart der Ersten Brünner Maschinenfabrik.

zahl sehr bedeutend, und es ist auch schwierig, ganz entsprechende Konstruktionen der Welle und der Schaufelbefestigung zu finden.

Diese Nachteile der Überdruckstufen im Hochdruckteil haben dazu geführt, sie durch ein Druckrad mit Geschwindigkeitsstufen zu ersetzen. Dadurch wird erreicht,

daß im Gehäuse selbst nur mehr verhältnismäßig kleine Drucke und Temperaturen vorkommen und daher weder das Verziehen desselben noch die Undichtheitsverluste sehr schädlich wirken, daß ferner eine wesentliche Verkürzung der Welle eintritt, wie Abbildung 109 erkennen läßt, in der eine reine Parsons-Trommel mit einer kombinierten zusammengestellt ist. Abbildung 110 zeigt eine solche gemischte Bauart im Zusammenbau mit einer Dynamomaschine, Abbildung 111 das auseinandergelegte Gehäuse derselben. Eine etwas andere Ausführung für kleinere Leistungen ist in Abbildung 112 dargestellt. Man erkennt hier deutlich das Gleichdruckrad mit drei Geschwindigkeitsstufen, das mit dem Ausgleichskolben zusammengegossen und mit der Trommel für die Überdruckschaufelung zentrisch verschraubt ist. Der Raum außerhalb des Ausgleichskolbens ist hier durch den Innenraum der Trommel mit dem Kondensator verbunden, während in Abbildung 110 ein besonderes Rohr hierzu angeordnet erscheint. Auch Abbildung 113 zeigt eine gemischte Bauart und läßt insbesondere die Anbringung der Gleich- und Überdruckschaufeln erkennen, sowie auch das Labyrinth zur Abdichtung der Welle auf der Hochdruckseite. Abbildung 114 stellt die Turbine von Barbezat dar. Das Gleichdruckrad arbeitet ohne Geschwindigkeitsstufen, die folgenden Überdruckstufen sind auf einer kegelförmigen Trommel angeordnet und so ausgeführt, daß sich der Reaktionsgrad gegen das Ende hin so weit vermindert, daß die letzten Stufen Gleichdruckstufen werden. Der Zweck dieser Anordnung besteht darin, daß hier die Umfangsgeschwindigkeiten und Stufenzahlen geringer werden.

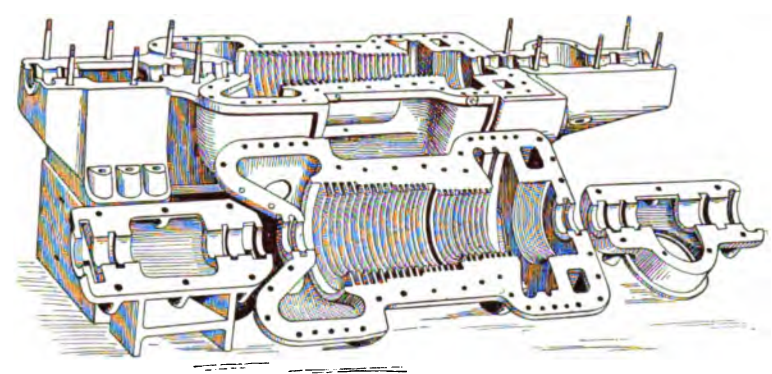


Abbildung 111. Gehäuse einer kombinierten Turbine.

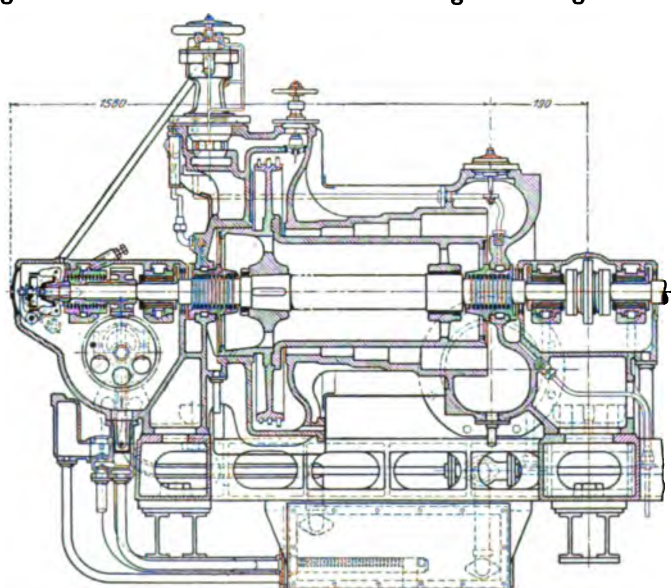


Abbildung 112. Turbine gemischter Bauart von Melms & Pfenninger (Breitfeld, Daněk & Ko.)

Statt des einfachen Gleichdruckrades mit oder ohne Geschwindigkeitsstufen kann man auch eine mehrstufige Gleichdruckturbine als Hochdruckteil benutzen, während der Niederdruckteil als Überdruckturbine verbleibt. Eine solche Turbine ist die von Melms & Pfenninger (Abbildung 115). Hier sind auch die Gleichdruckstufen auf einer Trommel angebracht, was wegen des großen abzudich-

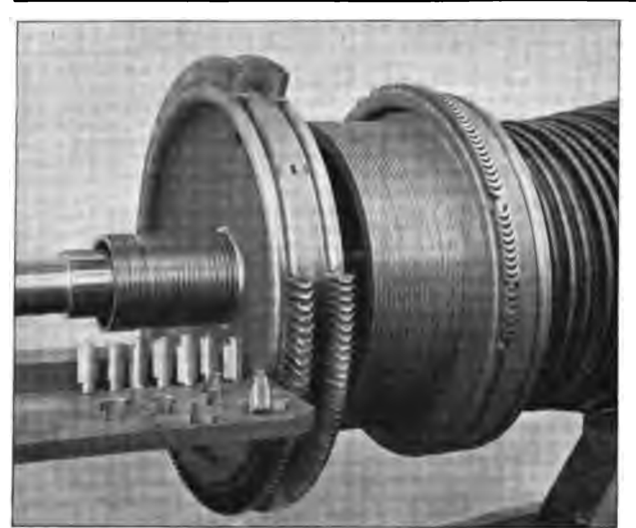


Abbildung 113. Trommel einer kombinierten Turbine.

tenden Umfangs zwischen Druckstufen besonders sorgfältige Durchbildung dieser Stellen erfordert.

Nun haben sich aber einige Firmen, die sonst die vielstufige Druckturbine bevorzugt hatten, auch entschlossen, dem Beispiel der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin zu folgen und die Hochdruckstufen durch ein Rad mit Geschwindigkeitsstufen zu ersetzen. Auch hier war maßgebend, daß im Gehäuse nur kleine Temperaturen und Drücke auftreten, sowie die Verkürzung der Welle, wenn auch die Schwierigkeiten bei den ersten Stufen von vornherein nicht so groß waren wie bei der Parsons-Turbine. Freilich müssen beim Düsenrad die große Dampfgeschwindigkeit und der mittelmäßige Nutzeffekt der Geschwindigkeitsstufen in Kauf genommen werden. Abbildung 116 stellt den Längenschnitt einer solchen Turbine dar, während Abbildung 117 eine Ansicht bei abgenommenem Gehäusedeckel zeigt. Belluzzo in Mailand endlich hat eine Vereinigung von Hochdruckrädern mit Geschwindigkeitsstufen, Mitteldruckrädern als einfache Druckstufen und endlich Niederdruckrädern mit Reaktion durchgeführt, die in Abbildung 118 gezeigt ist.

Bei diesen verschiedenen Turbinensystemen kann natürlich die Anordnung sehr verschieden sein. So zeigt z. B. Abbildung 119 (Westinghouse) eine gemischte Tur-

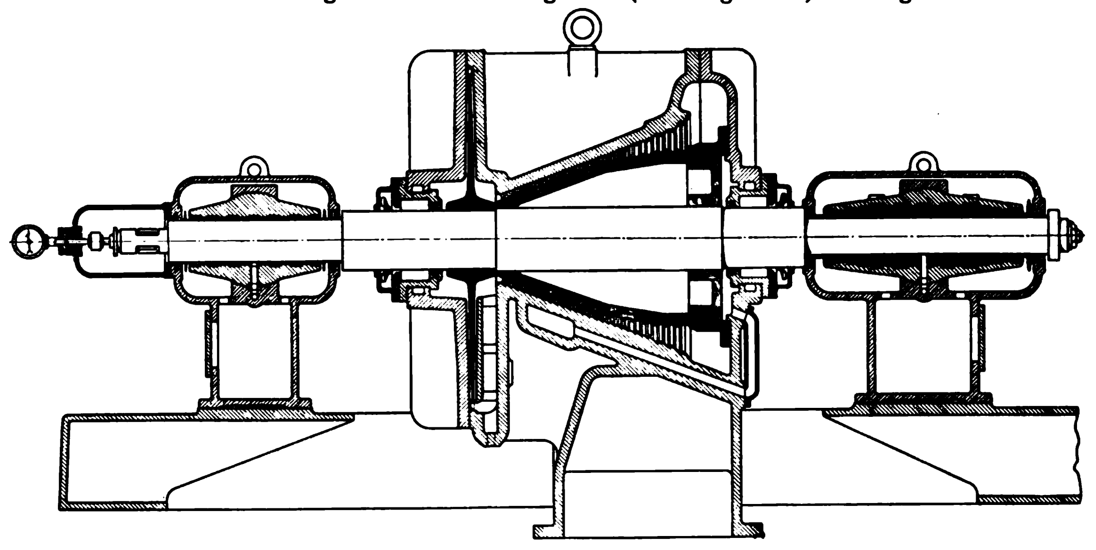


Abbildung 114. Kombinierte Dampfturbine von Barbezat.

bine mit dem Hochdruck-Geschwindigkeitsrad in der Mitte, links davon folgen die ersten Überdruckstufen, hinter denen sich der Dampfstrom teilt, wie durch Pfeile an-

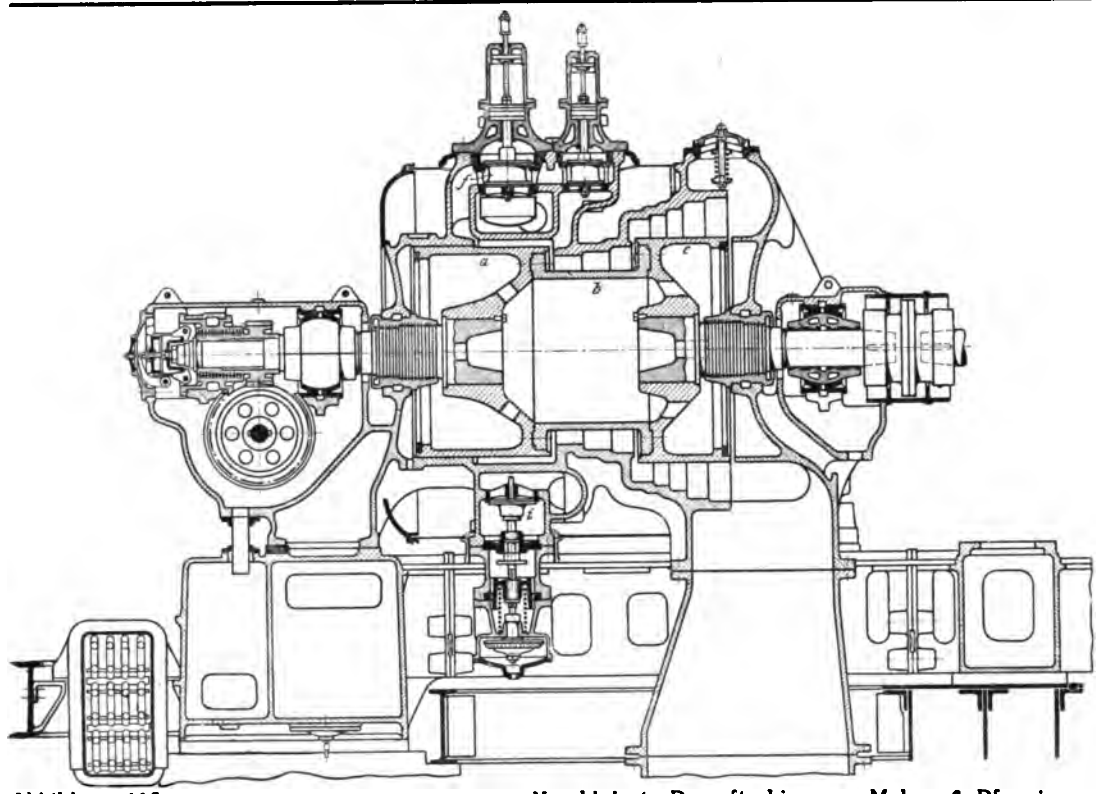


Abbildung 115. Kombinierte Dampfturbine von Melms & Pfenninger.

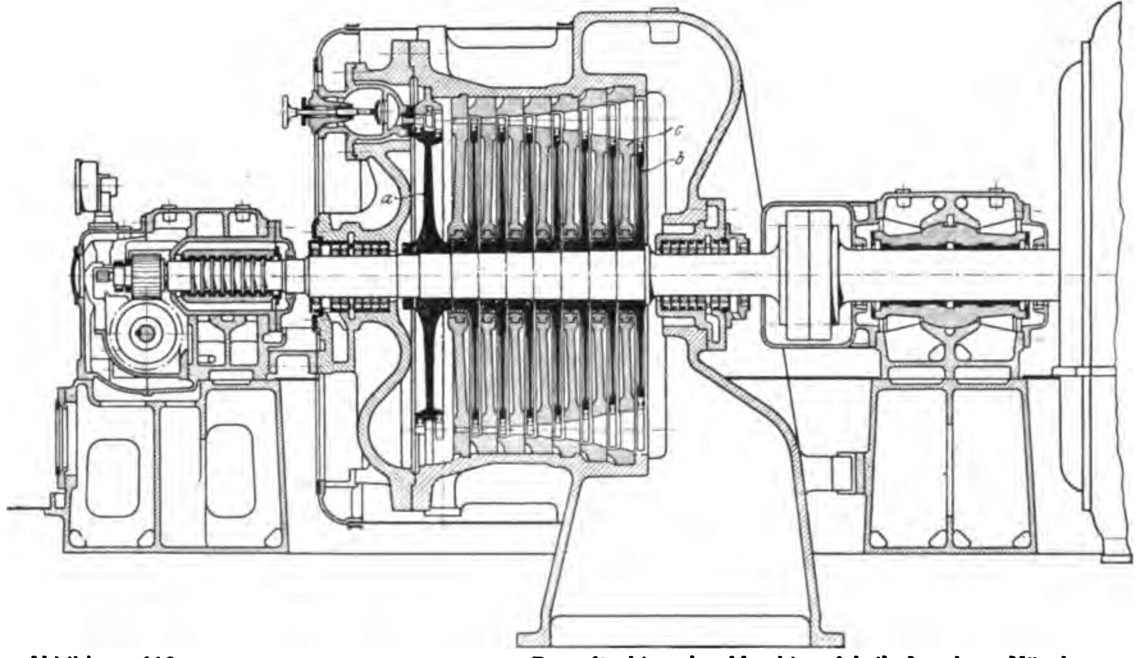
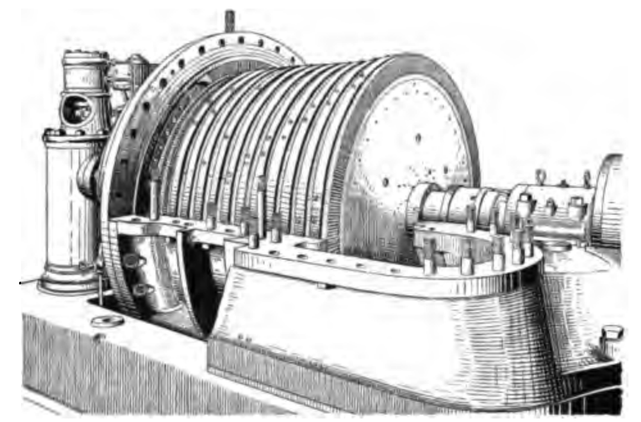


Abbildung 116. Dampfturbine der Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg.

gedeutet, und in die beiden Niederdruckteile gelangt. Man kann die Überdruckstufen statt auf einer Trommel auch auf einer Scheibe derart anordnen, daß der Dampf statt parallel zur Achse radial nach außen strömt. Abbildung 120 (Eyermann) zeigt eine solche Anordnung mit fliegendem Laufrad und vorgeschalteten Geschwindigkeitsstufen.



Abbild. 117. Dampfturbine der Bergmann-Elektrizitätswerke.

Als Beispiel für die Ausführung der Düsen dienen die Abbildungen 101 bis 103 nach den Ausführungen der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin. Sie sind entweder aus Bronze oder Nickelstahl gedreht und dann gepreßt oder aus besonderem Eisen gegossen. Abbildung 100 zeigt deutlich den Einbau derselben. Ähnlich werden diese Düsenkörper auch von den Bergmann-Elektrizitätswerken ausgeführt, wie Abbild. 121 zeigt. Die zugehörigen Schaufeln am Geschwindigkeitshochdruckrad werden durch Abbildung 122 dargestellt. Sie sind hier mit schwalbenschwanzförmigen Ansätzen in gleichgeformte Nuten des Rades eingesetzt, durch Distanzstücke in diesen Nuten und durch außen vernietete Bänder festgehalten. Die Leitapparate bei einfachen Druckstufen werden meist mit eingegossenen Blechschaufeln versehen; Abbildung 123 zeigt ein Leitrad mit voller Beaufschlagung. Dasselbe ist zweiteilig ausgeführt, die Öffnung für die Naben der benachbarten Laufräder ist mit Labyrinthdichtung versehen, der

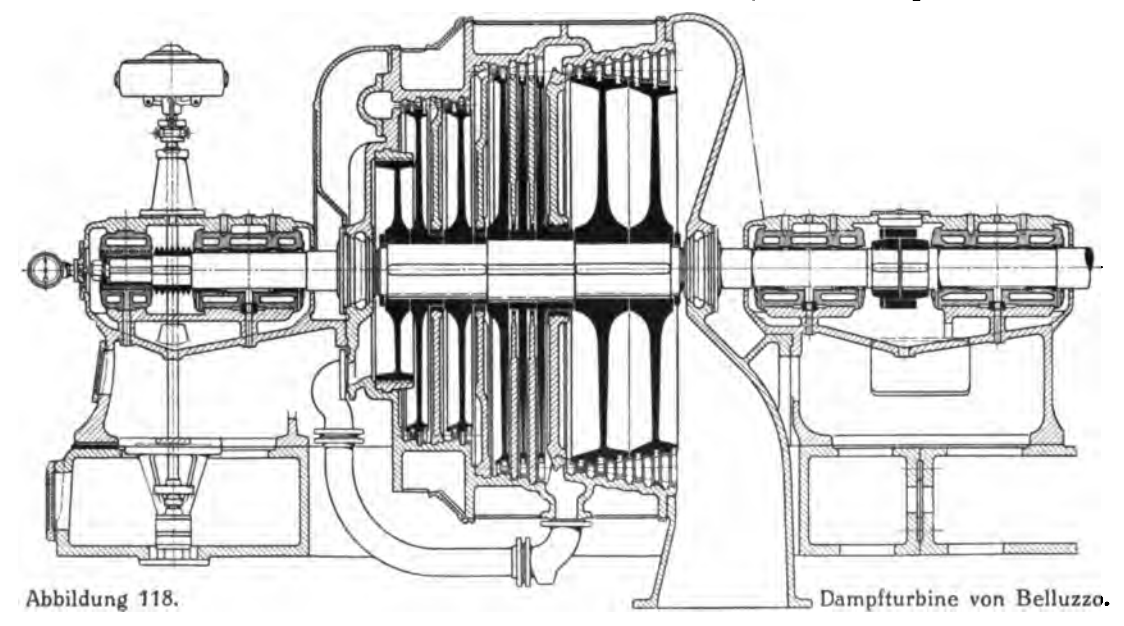


Abbildung 118. Dampfturbine von Belluzzo.

äußere Kranz wird vom Gehäuse dicht umschlossen und festgehalten. Ein solcher Leitapparat ist im Schnitt auch in Abbildung 124 zusammen mit dem zugehörigen Laufrad gezeichnet. Die Befestigung der Schaufeln bei diesen einstufigen Scheiben-

rädern geschieht entweder ähnlich wie in Abbildung 122 oder auch wie in Abbildung 124 zu ersehen.

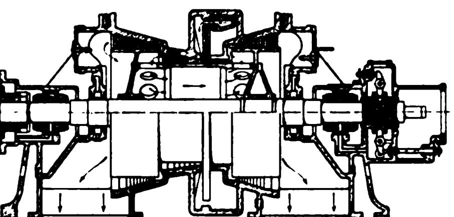
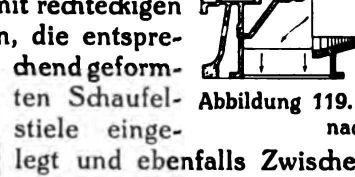


Abbildung 119. Parsons-Turbine nach Westinghouse.

Bei Überdruckturbinen, wo Trommeln in Anwendung kommen, werden diese mit rechteckigen oder hinterdrehten Nuten versehen, die entsprechend geformten Schaufelstiele eingelegt und ebenfalls Zwischenstücke dazwischen verstemmt. Abbildung 125 zeigt die Schaufelung der Brown-Boveri-Parsons-Ausführung, bei der die Nut mit einer Nase versehen und die Schaufeln in ihre Lage eingedreht werden. Ein verlöteter Draht hält die hier ohne Band ausgeführten Schaufeln auch außen in entsprechender Entfernung.



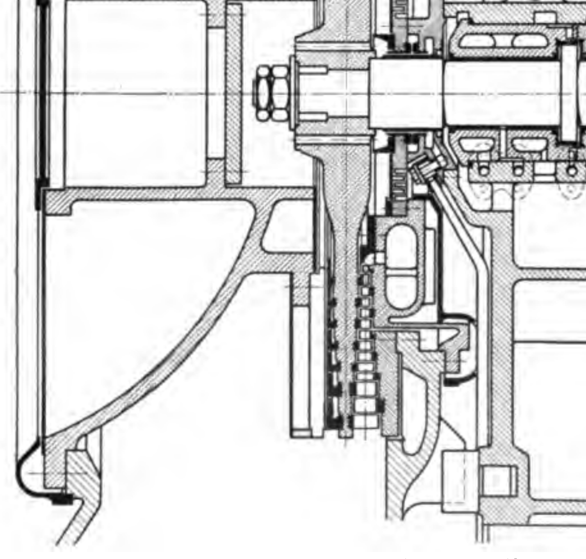


Abbildung 120. Radialturbine von Eyermann.

Die Radscheiben sind natürlich sehr genau zu berechnen, da ihre Beanspruchung infolge der großen Drehgeschwindigkeit sehr bedeutend wird. Bei den ebenfalls aus Stahl hergestellten Trommeln ist ganz besonders auf deren Befestigung auf den Wellenenden zu achten, mit Rücksicht darauf, daß bei veränderten Temperaturen leicht eine Lösung dieser Verbindung eintreten kann.

Wichtig für die Berechnung der Turbinenwellen ist die sogenannte „kritische" Geschwindigkeit. Wenn man sich nämlich eine nicht vollkommen ausgewuchtete Scheibe rasch rotierend denkt, so wird ihr schon in der Ruhe außerhalb der Achse liegender Schwerpunkt sich von dieser immer weiter entfernen, bis bei einer gewissen Umdrehungszahl die Durchbiegung unendlich groß würde, wenn nicht vorher schon der Bruch eingetreten wäre. Diese kritische Drehzahl ist unabhängig von der ursprünglichen Schwerpunktslage. Wird durch Führungen eine zu große Verbiegung der Welle verhindert, so stellt sich bei Überschreitung der kritischen Geschwindigkeit seltsamerweise wieder ein stabiler Zustand ein, der in der Tendenz der Schwungmasse, sich um den Schwer-

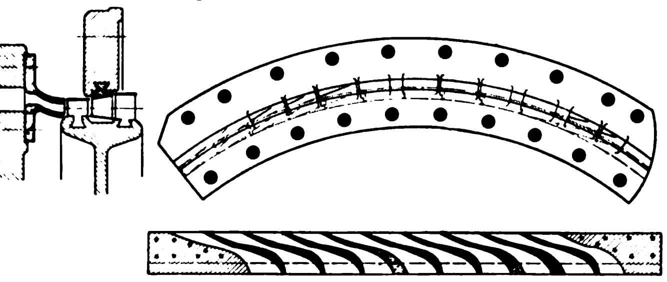
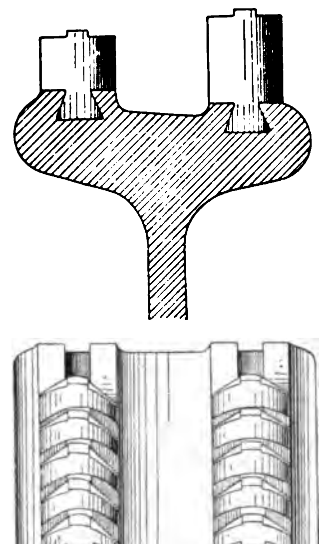


Abbildung 121. Düsenkörper der Bergmann-Elektrizitätswerke.



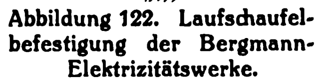


Abbildung 122. Laufschaufelbefestigung der Bergmann-Elektrizitätswerke.

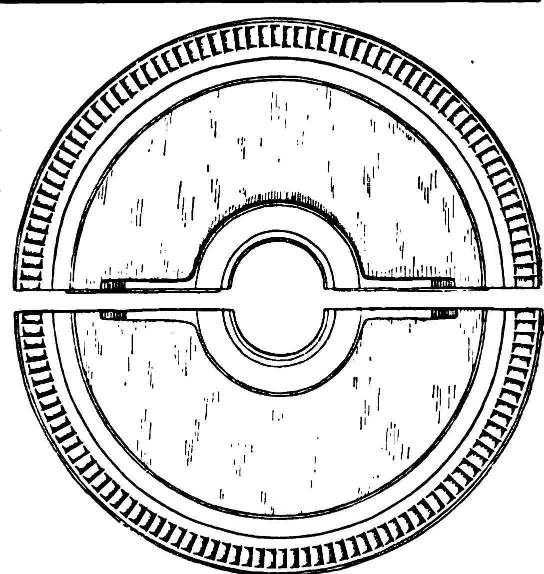


Abbildung 123. Leitrad der Bergmann-Elektrizitätswerke.

punkt zu drehen, seine Ursache hat. Dieser Umstand begründet die Richtigkeit der Konstruktion von de Laval (Abbild. 126), bei dessen Turbine eine siebenfach höhere Umdrehungszahl als die kritische erreicht wurde. Die Lager der Turbinenwelle sind den hohen Umlaufzahlen und Beanspruchungen entsprechend sehr sorgfältig auszuführen. Ihre Konstruktion geht aus den Gesamtzeichnungen im wesentlichen hervor. Die Kupplung der Turbinenwelle mit der Dynamowelle erfolgt entweder starr oder beweglich, in letzterem Falle derart, daß die beiden Wellen sowohl in radialer Richtung als auch bezüglich Verdrehungen eine gewisse Nachgiebigkeit zeigen. Dies wird durch elastische Zwischenglieder, wie Stahldrähte, oder durch Zahnkupplungen mit kleinen Spielräumen erreicht.

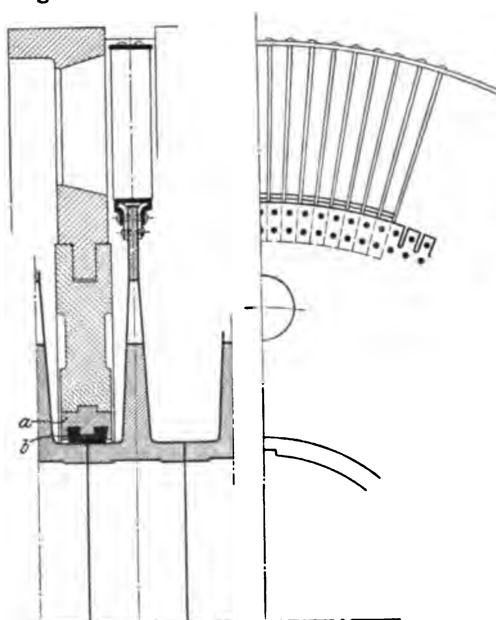


Abbildung 124. Schaufelung zur Turbine der Bergmann-Elektrizitätswerke.

Einen heiklen Teil der Turbinen bilden die Dichtungsstellen. Zumeist werden hier Labyrinthdichtungen verwendet, die darin bestehen, daß eine größere Zahl von engen Querschnitten hintereinandergeschaltet ist, um so den durchtretenden Dampf allmählich zu entspannen, ohne daß zwischen den bewegten und ruhenden Teilen eine Berührung und damit Reibung und Erwärmung eintritt. Wo die achsiale Lage genau eingehalten werden kann, verwendet man radiale Labyrinthe, wie in Abbildung 127 für Stopfbüchsen und Entlastungskolben einer Überdruckturbine dargestellt. Wo Längsverschiebungen durch Wärmedehnungen möglich sind, wird das sogenannte achsiale Labyrinth angewendet. Eine Form desselben zeigt Abbildung 128.

Statt der Labyrinthe werden aber auch Wasserstopfbüchsen verwendet, wie z. B. in Abbildung 129, deren wesentlichster Teil eine

mit der Turbinenwelle umlaufende Scheibe ist, die am Umfang mit Rillen und an den Seitenflächen mit schaufelartigen Rippen versehen ist, die das zugeführte Wasser nach außen schleudern und dadurch die Abdichtung bewirken.

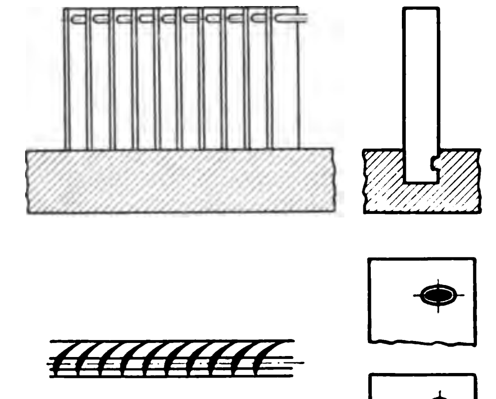


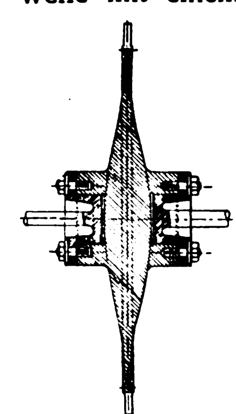


Abbildung 125. Laufschaufeln der Brown-Boveri-Parsons-Turbine.

Hat ein Labyrinth gegen Vakuum zu dichten, also den Luftzutritt von außen zu verhindern, so wird in eine Kammer sogenannter Sperrdampf eingeführt, der die Luft nach außen drückt und so die Gefahr der Verschlechterung des Vakuums vermeiden läßt (Abbildung 128).

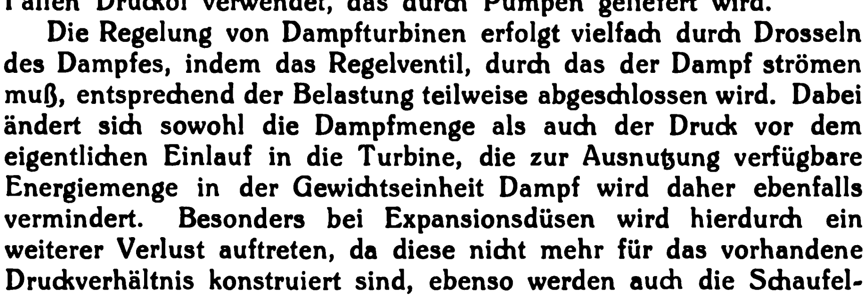
Auch feste Liderung wird verwendet, die aus Weißmetall-, Graphit- oder Kohlenringen besteht, deren zylindrische Innenflächen die Welle mit einem kleinen Druck umschließen.





Abbild. 126. Laufrad einer Laval-Turbine.

Zur Schmierung der raschlaufenden Lager wird in den meisten Fällen Drucköl verwendet, das durch Pumpen geliefert wird.



Die Regelung von Dampfturbinen erfolgt vielfach durch Drosseln des Dampfes, indem das Regelventil, durch das der Dampf strömen muß, entsprechend der Belastung teilweise abgeschlossen wird. Dabei ändert sich sowohl die Dampfmenge als auch der Druck vor dem eigentlichen Einlauf in die Turbine, die zur Ausnutzung verfügbare Energiemenge in der Gewichtseinheit Dampf wird daher ebenfalls vermindert. Besonders bei Expansionsdüsen wird hierdurch ein weiterer Verlust auftreten, da diese nicht mehr für das vorhandene Druckverhältnis konstruiert sind, ebenso werden auch die Schaufelwinkel nicht mehr entsprechen.

Im Gegensatz hierzu würde man eine theoretisch richtige Regelung erhalten, wenn sämtliche Durchgangsquerschnitte entsprechend der Belastung verkleinert werden könnten. Zumeist begnügt man sich mit dem nach und nach erfolgenden Abschluß der einzelnen Düsen, wenn eine Anzahl derselben vorhanden ist. Bei mehrstufigen Turbinen wird in den meisten Fällen nur die erste Stufe in dieser Art geregelt. Bei dieser Art der Regelung wird stets nur der Dampf für eine Düse gedrosselt, während die übrigen ganz geöffneten auch die volle Dampfspannung erhalten, ein Drosselungsverlust wird daher nur bei sehr kleinen Belastungen stark merkbar.

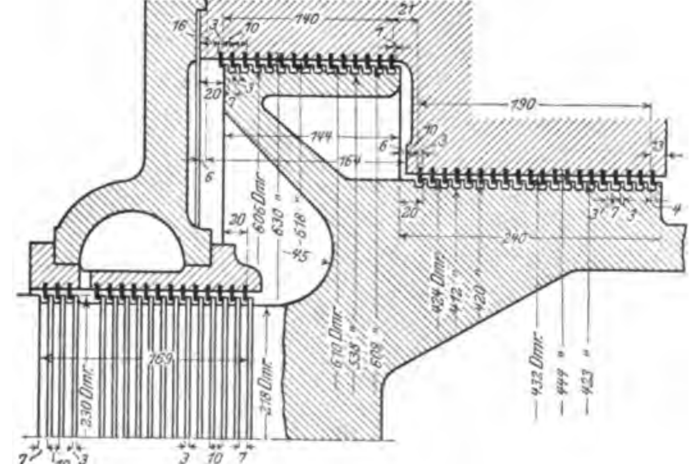


Abbildung 127. Radiale Labyrinthdichtung.

Als Regler werden wie bei Dampfmaschinen zumeist Federregler mit kleiner Masse verwendet. Fast durchweg benutzt

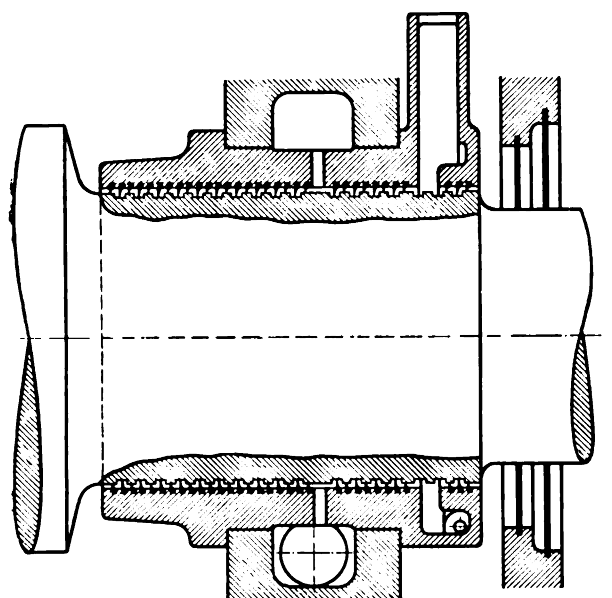


Abbildung 128. Achsiale Labyrinthdichtung.

man die sogenannte indirekte Regelung unter Einschaltung eines Kraftgetriebes, das mit Dampf- oder Öldruck betrieben wird und die immerhin bedeutenden Regelungswiderstände zu überwinden hat.

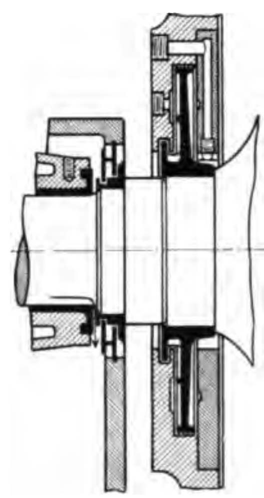


Abbildung 129. Wasserstopfbüchse.

Ein derartiges Kraftgetriebe besteht im wesentlichen aus einem Kraftzylinder, dessen Kolben mittels einer Steuerung vom Regler in Bewegung gesetzt wird (Abbildung 130). Wenn der Regler sich nach oben bewegt, wird durch den Hebel a der Steuerschieber s derart bewegt, daß Drucköl auf den mit dem Drosselventil verbundenen Kraftkolben k nach abwärts wirkt und das Ventil schließt. Dabei wird aber auch das rechte Hebelende nach abwärts bewegt und hierdurch der Steuerschieber wieder für die neue Muffenstellung des Reglers in die Schlußlage gebracht, so daß der Kraftkolben festgehalten wird (Rückführung).

Diese Regelung ist auch in Abbildung 131 im Querschnitt dargestellt. Die einzelnen Düsengruppen sind hier mit der Hand gesondert einzuschalten, je nachdem die Belastung es erfordert. Bei der durch Abbildung 132 gezeigten Regelung werden die Düsen hintereinander selbsttätig durch Daumen, die auf einer vertikalen Führungsstange angebracht sind, und entsprechende Rollen an den Ventilspindeln geöffnet. Ähnlich geschieht dies auch nach Abbildung 133, wo die Daumen auf einer vom Kraftgetriebe gedrehten Welle etwas gegeneinander versetzt sind.

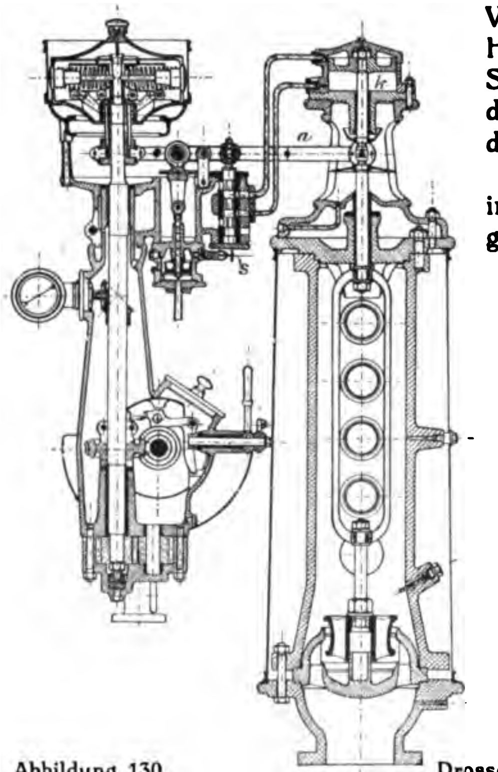


Abbildung 130. Drosselregelung der A. E.-G.

Manche Turbinenbauanstalten verbinden die beiden Regelungsarten, wie z. B. Brown-Boveri & Ko. in Baden, Schweiz (Abbildung 134 u. 135). Die Ölpumpe r, die unmittelbar von der Reglerwelle angetrieben wird, drückt Öl unter einen auf der Spindel p des Drosselventils q sitzenden Kolben o. Der Ölabfluß bei t wird unmittelbar von der Reglermuffe k gesteuert, d. h. je nach Bedarf geöffnet oder geschlossen. Bei Belastungswechsel ändert nämlich der Regler i die Muffenlage und damit den freien Querschnitt für das durch die Öffnungen der Regelbüchse l abfließende Öl, wodurch wieder der wirksame Druck unter dem Kolben o beeinflußt wird und dieser eine der Federkraft entsprechende Gleichgewichtslage annimmt. Nach dem Vorgange von Parsons erhält das Drosselventil zur Vermeidung von Verspätungen durch die Reibung von vornherein eine zwangläufige schwingende Bewegung, die hier durch die umlaufende Reglerspindel eingeleitet wird. Der in der Reglerbüchse laufende, von der Muffe achsial verstellte Drehschieber hat nämlich eine abgeschrägte obere Kante, wodurch die Durchströmöffnung abwechselnd mehr geöffnet und geschlossen wird; dabei kommt auch der Kolben o mit dem Ventil q in Schwingung. Damit aber bei kleinen Belastungen der Dampfverbrauch nicht zu hoch wird, sind hier noch zwei selbsttätige Düsenventile (Abbildung 136) angebracht, die sich bei kleiner werdendem Dampfdruck nacheinander öffnen. Die Abbildung 137 zeigt ihre Anordnung und noch ein von Hand zu betätigendes Zusatzventil.

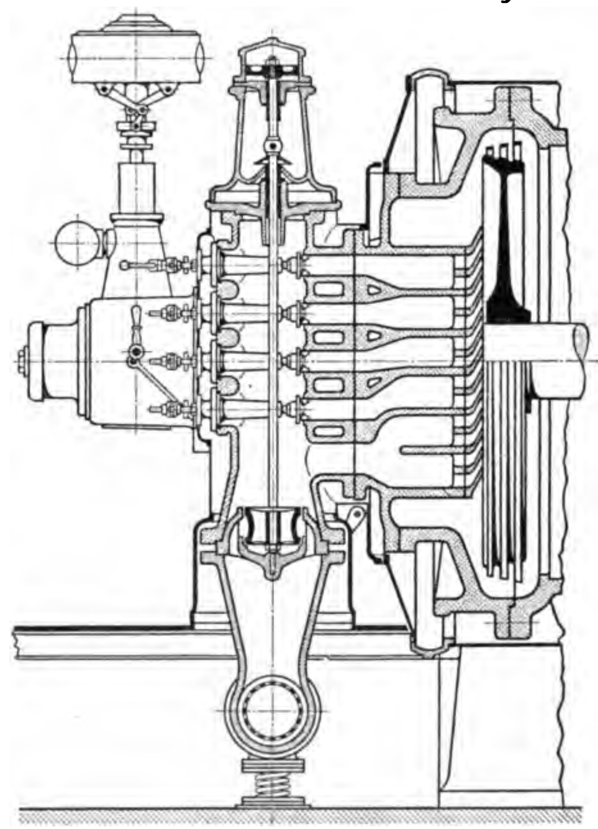


Abbildung 131. Drosselregelung der Allg. E.-G.

Abbildung 138 hingegen zeigt reine Drosselregelung durch einen Schieberkolben mit mehrfachem Abschluß, dessen schwingende Bewegung hier dadurch hervorgerufen wird, daß die Reglermuffe eine in sich zurückkehrende schiefe Ebene bildet und durch eine kleine Rolle am Reglerhebel diesen ein klein wenig auf und ab bewegt. Der am anderen Ende des Hebels befestigte Steuerschieber verändert die Auslaßöffnung für den Dampf unter dem Kraftkolben an der Hauptschieberspindel, der von oben her mit einer nachstellbaren Feder belastet ist.

In diesen beiden Fällen ist die Rückführung des Steuerschiebers dadurch ersetzt, daß bei verschiedenen Stellungen des Schiebers die Pressung unter dem Kraftkolben und damit unter dem Einfluß der Belastungsfeder seine Lage verändert wird. Jeder Umdrehungszahl entspricht damit wiederum eine bestimmte Stellung des Drosselventils.

Bei allen diesen Regelungen ist der Dampfverbrauch bei größter Belastung am geringsten, es wäre aber natürlich vorteilhafter, die jedenfalls beträchtlich unter der

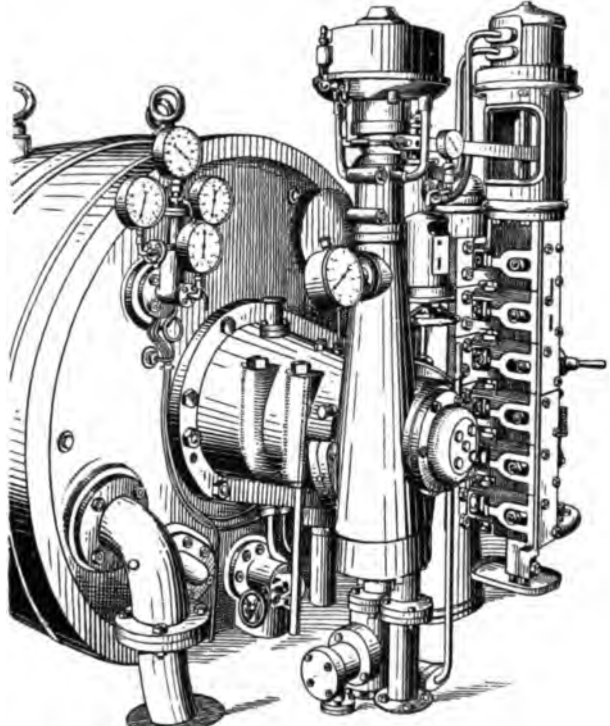


Abbildung 132. Düsenregelung der Allg. E.-G.

allergrößten liegende Normalbelastung als günstigste zu gestalten. Dies wird durch selbsttätige Überlastungsventile bewirkt, indem bei Überschreitung der Normalleistung dadurch Dampf unmittelbar in eine mittlere Stufe geleitet wird. Abbildung 107 zeigt die Anordnung eines solchen Überlastungsventils bei einer Parsonsturbine, Abbildung 139, das Ventil in größerem Maßstabe. Es steht unter dem Einfluß des Dampfdrucks vor der Turbine und jenes in der betreffenden Stufengruppe, sowie einer einstellbaren Federkraft. Erreicht der Druck in der ersten Stufe eine gewisse Höhe, so öffnet sich das Ventil und Frischdampf strömt unmittelbar in die niedere Stufe ein. Auch Abbildung 115 zeigt ein Überlastungsventil für gemischte Bauart.

Der Antrieb der Reglerwelle geschieht gewöhnlich von der Turbinenwelle aus mittels Schneckenantriebes, die Reglerwelle treibt zumeist auch die Ölpumpe für die Lagerschmierung und gegebenenfalls auch für die Öldruckregelung.

Neben der Hauptregelung ist stets auch noch eine Sicherheitsregelung vorhanden, die bei Überschreiten einer allzu hohen Umdrehungszahl das Hauptanlaßventil zum Schließen bringt. Gewöhnlich geschieht dies durch Anschlagen eines Schwungpendels an einer Knagge, die dann das Anlaßventil gegenüber einer Feder- oder Öldruckbelastung freigibt (vgl. Abbildung 135).

Man hat bald erkannt, daß bei Dampfturbinen ein weitaus größeres Vakuum noch wirtschaftliche Vorteile bietet als bei hin und her gehenden Dampfmaschinen, hat also dementsprechend auch größeren Wert auf vollkommene Ausbildung der Kondensationsanlagen gelegt. Diese unterscheiden sich aber im wesentlichen nur dadurch von jenen der Dampfmaschinen, daß sie gesonderten Antrieb besitzen müssen, durch eigene kleine Dampfturbinen oder Elektromotoren. Abbildung 140 zeigt eine Oberflächenkondensationsanlage mit elektrischem Antrieb. Die Besonderheit der Dampfturbinenkondensation hat immerhin dazu geführt, auch die Luftpumpe von der hin und

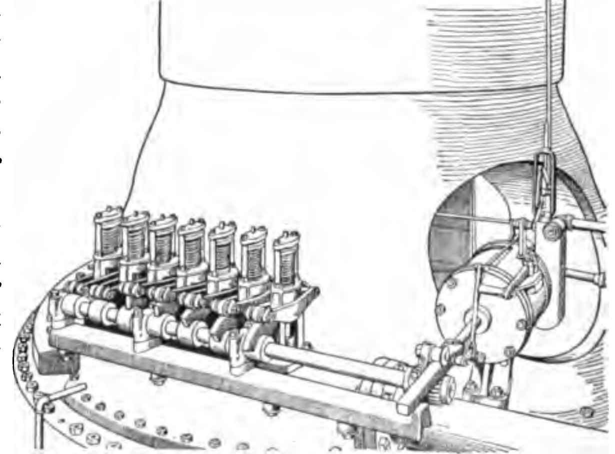


Abbildung 133. Düsenregelung einer Curtis-Turbine.

her gehenden Bewegung zu befreien, und so wurde außer dem bereits früher verwendeten Strahlkondensator auch der Kreiselkondensator in Verwendung gebracht. Das dem Kondensatorraum zufließende Betriebswasser wird durch eine Kreiselpumpe auf höhere Geschwindigkeit gebracht und wirkt dann wie in einem Strahlkondensator, indem es die umgebende Luft mitreißt und verdichtet (Abbild. 141). Das bei L eintretende Betriebs- bzw. Einspritzwasser tritt aus dem anschließenden Kreiselrad L_1 als mehrfach geteilter Strahl s aus und verdichtet das bei A eintretende Dampf-Luft-Gemisch in der sich unten anschließenden erweiterten Düse d. Zum sicheren Anlassen mit Dampf dient das Ventil e.

Im allgemeinen zieht man bei Dampfturbinen wegen des erreichbaren höheren Vakuums Oberflächenkondensation vor, wo man auch das ölfreie und warme Kondensat unmittelbar zur Speisung verwenden kann. Freilich sind die Anschaffungskosten dieses Systems wesentlich höher. Wenn mit freiem Auspuff gearbeitet wird, ist die Wärmeausnutzung in der Dampfmaschine höher als in der Dampfturbine. Es liegt demnach trotz der verwickelten Anlage die Möglichkeit vor, zur Erreichung größter Wirtschaftlichkeit Dampfmaschine und Dampfturbine hintereinandergeschaltet anzuwenden. Es haben aber auch andere Gründe zu dieser Verbindung geführt. Zuerst konnte überall, wo man Abdampf in größeren Mengen zur Verfügung hatte, noch eine Dampfturbine ohne Erhöhung des Kohlenverbrauchs zur Erzeugung von elektrischem Strom verwendet werden. Dies ist jedoch auch überall

Abbildung 134. Anlaß- und Regelventil der Brown-Boveri-Parsons-Turbine.

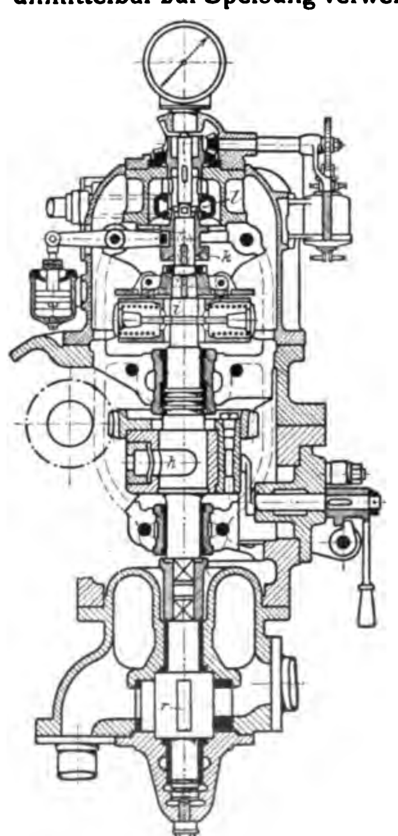


Abbildung 135. Ölsteuerung nach Brown-Boveri-Parsons.

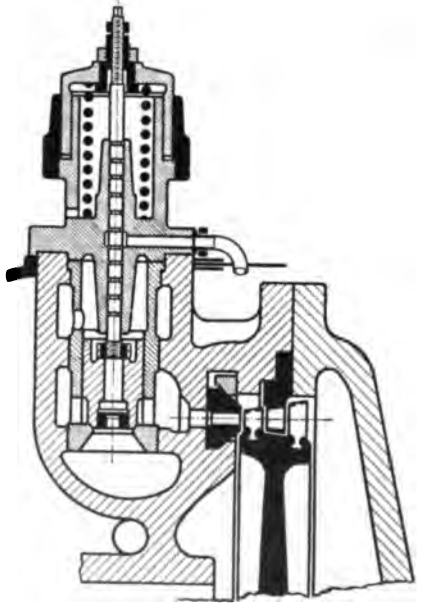


Abbildung 136. Düsenregelung von Brown, Boveri & Ko.

dort der Fall, wo bei Dampfmaschinen Verbundwirkung und Kondensation schwerer angewendet werden können, wie bei umkehrbaren Walzenzugs- und Fördermaschinen. In diesen Fällen aber gibt es häufige Betriebspausen, und es erscheint daher eine Aufspeicherung der Energie des Abdampfes zur Ausgleichung dieser Betriebsschwankungen erforderlich. Abbildung 142 zeigt den von Rateau hierzu verwendeten Akkumulator. Er besteht aus einem teilweise mit Wasser gefüllten, zylindrischen Gefäß, in dem der aus der Dampfmaschine austretende Dampf kondensiert wird, während in den Betriebspausen durch den im Akkumulator sinkenden Dampfdruck das erwärmte Wasser wieder verdampft. Wenn aus irgendeinem Grunde der von der Dampfmaschine kommende Abdampf zu gering ist oder ganz ausbleibt, würde der Druck im Akkumulator zu weit sinken. Deshalb wird dann selbsttätig ein Frischdampfventil gegen den Dampfraum hin geöffnet; ebenso wird ein Sicherheitsventil gegen zu hohen Druck angebracht, sowie ein Wasserablaßventil zur Entfernung des sich durch Wärmeverluste stets bildenden Kondenswassers. Die Abdampfturbine unterscheidet sich nicht wesentlich von der Hochdruckturbine, hier gewinnt nur die Teilung des Dampfstroms insbesondere bei Überdruckturbinen an Bedeutung (Abbildung 143). Wo längere Betriebspausen eintreten, werden die Niederdruckturbinen meist auch zur selbsttätigen Aufnahme von Frischdampf eingerichtet, indem ein Hochdruckteil durch Öffnen eines Ventils in Betrieb gesetzt wird. Hier ist ein Geschwindigkeits-Hochdruckrad angebracht. Eine richtige Regelung hat deshalb nicht nur für Änderungen in der Belastung der Turbine, sondern auch noch für Druckunterschiede des Abdampfes zu sorgen, wird also, wie die patentierte Ausführung der Skodawerke in Pilsen zeigt (Abbildung 144), immerhin recht verwickelt. Anderseits arbeitet im Falle der Mitverwendung von Frischdampf die „Verbundturbine“ bei gleicher Belastung ungünstiger als die reine Abdampfturbine, weil die Nieder-

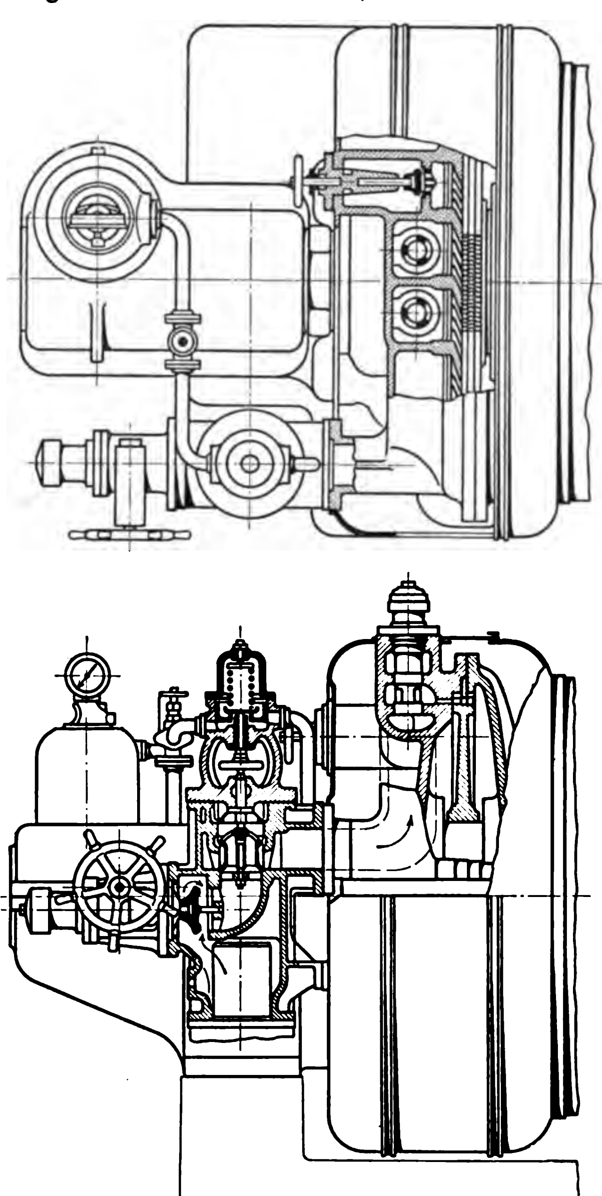


Abbildung 137. Düsenregelung von Brown, Boveri & Ko.

druckschaufeln für diesen Fall zu große Querschnitte aufweisen. Deshalb führt die Maschinenfabrik Örlikon ihre Frischdampf-Abdampfturbinen so aus, daß eigentlich zwei gesonderte Abdampfturbinen, N_1 und N_2 (Abbildung 145), vorhanden sind, von denen nur eine (N_1) an die Hochdruckturbine H selbsttätig angeschlossen werden kann, während die zweite (N_2) stets als reine Abdampfturbine arbeitet (Abb. 146).

In vielen Industrien, wo Dampf zu Heizzwecken verwendet wird, entnimmt man diesen einer entsprechenden Zwischenstufe, wo er schon einen Teil seiner Arbeit abgegeben hat. Hierzu dient ein selbsttätiges federbelastetes Anzapfventil, das sich öffnet, wenn in dem zur Heizung führenden Rohr der Druck auf einen bestimmten Betrag sinkt, und geschlossen wird, wenn dieser Druck steigt, so daß aus dem Heizraum kein Dampf zur Turbine zurückkehren kann. Hoch- und Niederdruckteil der Turbine sind durch Labyrinthdichtung voneinander abgetrennt und nur durch das selbsttätige Ventil miteinander verbunden.

Abbildung 138. Drosselregelung der Ersten Brünner Maschinenfabrik.

Außer zum Antrieb von Dynamomaschinen benutzt man Dampfturbinen auch zum unmittelbaren Betrieb von Turbokompressoren (Abbildung 147) sowie von Ventilatoren und Zentrifugalpumpen.

Besonders aber als Kraftmotor für den Antrieb größerer Dynamomaschinen hat die Dampfturbine alle anderen Maschinen aus dem Felde geschlagen. Neben ihrer großen

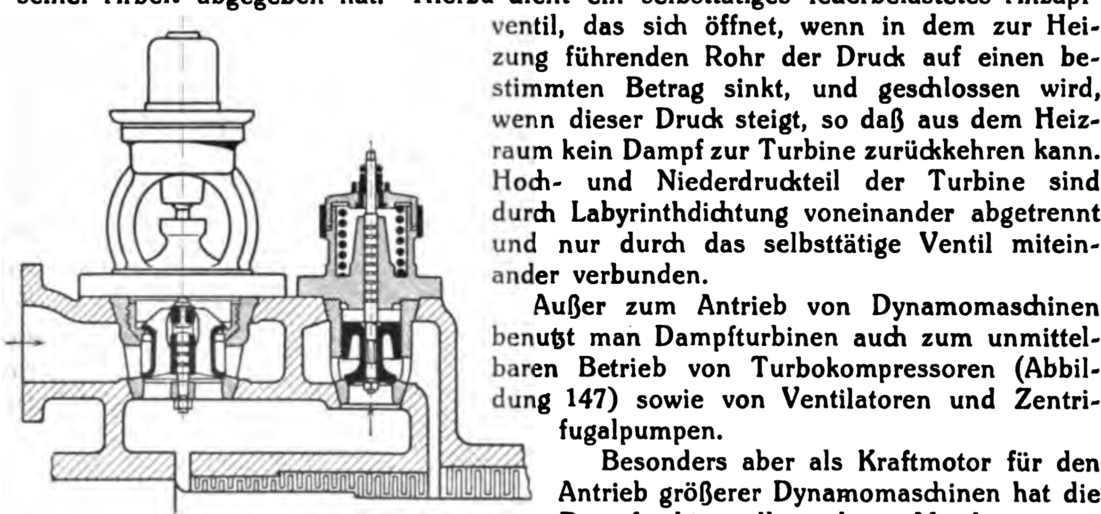
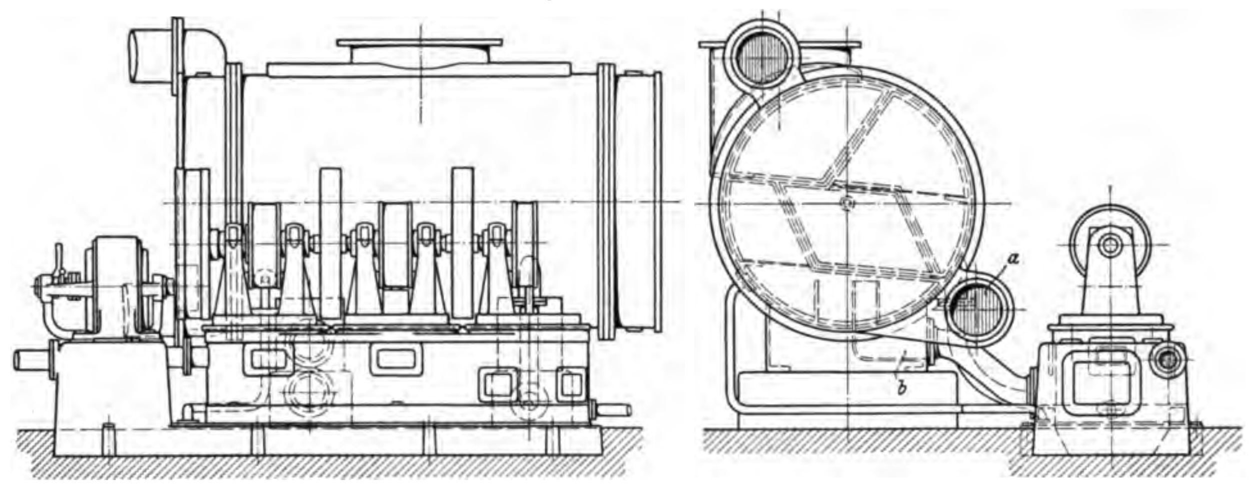


Abbildung 139. Regel- und Überlastungsventil einer Parsonsturbine.

Wirtschaftlichkeit im Verein mit schnellaufenden Dynamos, die sie der günstigen Anwendung hohen Vakuums und hoher Überhitzung verdankt, liegt ihr Vorzug in dem geringen Raumbedarf und geringeren Fundierungskosten, ferner in der leichteren und bequemeren Bedienung, dem geringen Ölverbrauch und der Freihaltung des Kondenswassers von Öl selbst bei Einspritzkondensation, so daß man es unmittelbar zur



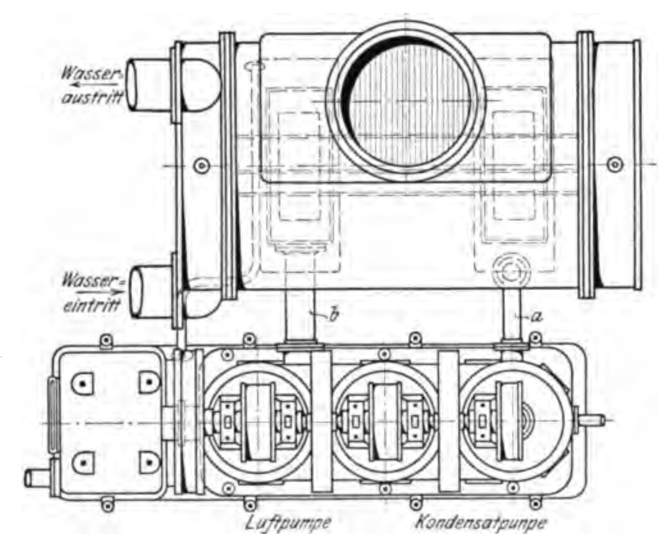


Abbildung 140. Oberflächenkondensation mit nassen Luftpumpen (Erste Brünner Maschinenfabrik).

Kesselspeisung verwenden kann. Da die Dampfturbine nur einen umlaufenden Körper hat, ist ihr Aufbau rasch ermöglicht und auch die Zugänglichkeit und Auswechselbarkeit ihrer Teile einfach erreichbar. Der gleichmäßige Gang der Dampfturbine erleichtert auch die tadellose Regelung, das Ingangsetzen ist in jeder Stellung und in kürzester Zeit möglich.

Aus diesen Gründen hat die Dampfturbine ihr heutiges Verwendungsgebiet in überraschend kurzer Zeit erobert. Die großartige Arbeitsleistung der Ingenieure, denen es heute so ziemlich vollkommen gelungen ist, alle die bedeutenden technischen Schwierigkeiten zu überwinden, wird nur noch von dem bewunderungswürdigen Einfluß übertroffen, den die Theoretiker auf die Entwicklung dieser Maschinenart genommen haben; es kann nicht unterlassen werden, hier auf die glänzenden Arbeiten Stodolas hinzuweisen, der das ganze Gebiet in vertieftester und umfassendster Weise bearbeitet hat.

4. VERBRENNUNGSMASCHINEN

Nach der Erfindung Ottos hatte sich die Gasmaschine wegen ihrer Einfachheit gegenüber jeder Dampfmaschinen- und Kesselanlage insbesondere für kleine Leistungen allgemein eingeführt, anfangs nur als Leuchtgasmaschine mit ihrer

Abhängigkeit von Gaswerken. Die Errichtung gesonderter Gasgeneratoren ließ letztere zwar entbehrlich erscheinen, machte aber die Anlage immerhin verwickelt, man suchte

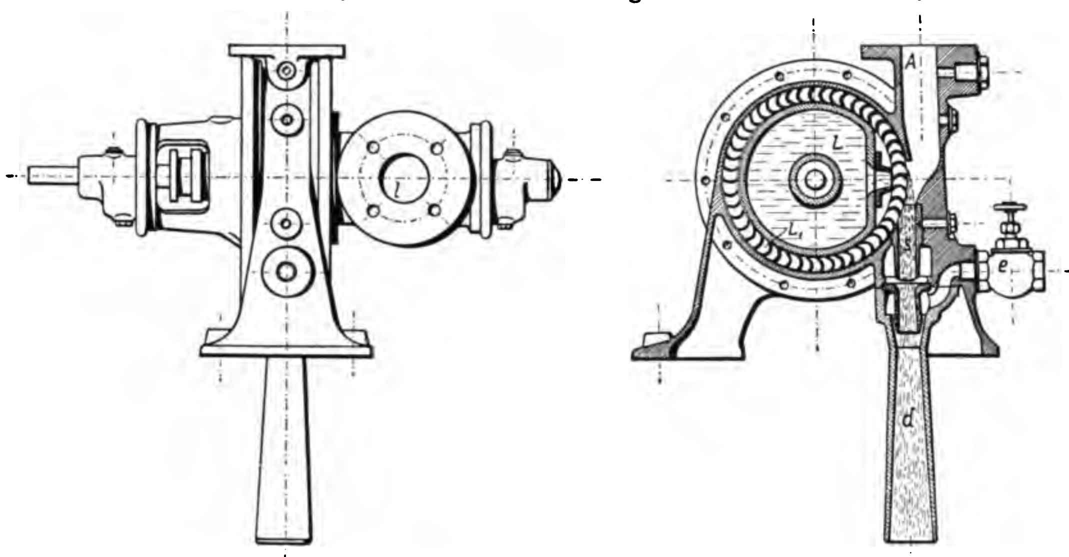
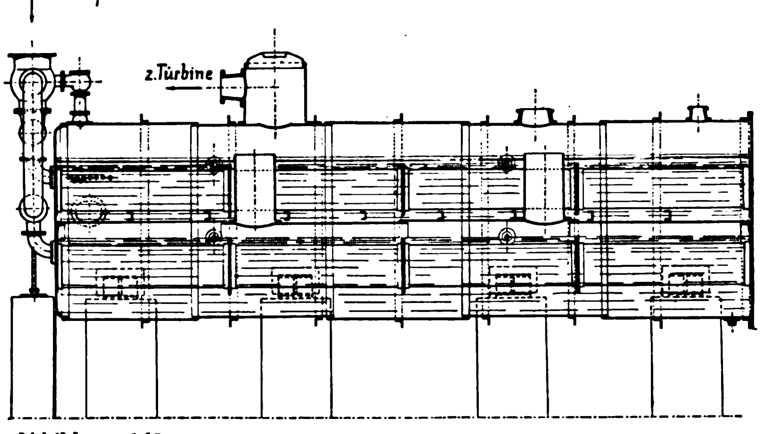


Abbildung 141. Kreiselluftpumpe von Westinghouse-Leblanc.

deshalb flüssige Brennstoffe, Petroleum, Benzin, Spiritus u. a., zu verwenden. Als dann endlich die Sauggasanlagen die Wirtschaftlichkeit und Einfachheit der Generatoren weiter erhöht hatten, wurden größere Ausführungen gebräuchlich, und endlich entstand durch unmittelbare Ausnutzung der Gicht- und Koksofengase die Großgasmaschine.

Bevor wir auf Einzelheiten eingehen können, müssen hier die verschiedenartigen Arbeitsweisen besprochen werden. Nachdem die ersten Formen der Gasmaschine



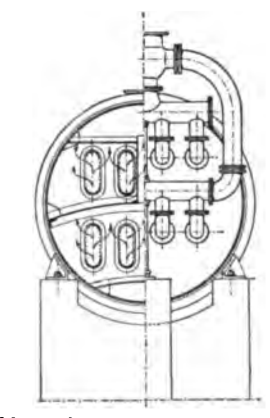


Abbildung 142. Akkumulator von Rateau.

keineswegs genügt hatten, trotzdem ihre Wirtschaftlichkeit nachgewiesen war, hat Otto den sogenannten „Viertakt" eingeführt. Diese Arbeitsweise besteht darin, daß der Kolben zuerst ein Gemisch von Gas und Luft ansaugt und es dann nach Umkehr

seiner Bewegungsrichtung bis zu einem Druck verdichtet, der vom Verhältnis des verbleibenden Volumens im sogenannten „Laderaum" zu dem vom Kolben durchlaufenen Volumen abhängig ist. Am Ende des Verdichtungshubes tritt die Zündung des Gasgemisches ein, deren Folge eine rasche Verbrennung, die sogenannte „Verpuffung", mit entsprechender Temperatur- und Druckerhöhung ist. Die gespannten Gase dehnen sich entsprechend dem vom Kolben neuerdings freigegebenen Raum aus, indem sie dem Kurbelgetriebe Arbeit zuführen, endlich werden beim neuerlichen Rückgang des Kolbens die im Zylinder verbliebenen verbrannten Gase ausgetrieben, und nur im

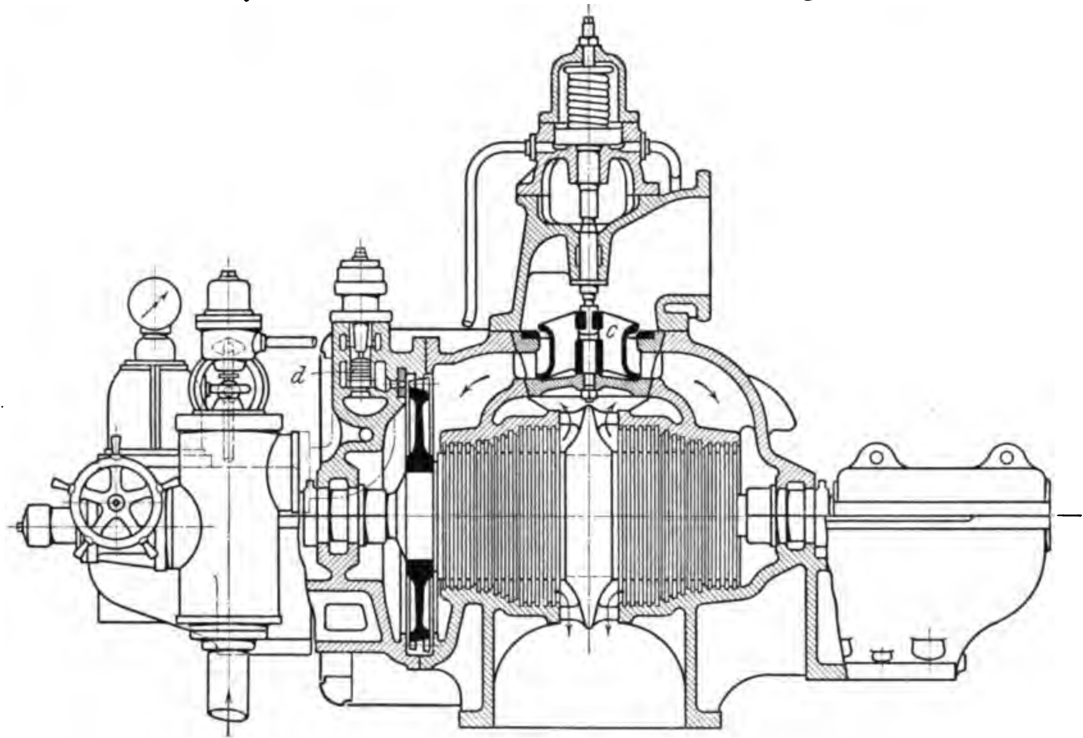


Abbildung 143. Frisch- und Abdampfturbine von Brown, Boveri & Ko.

Laderaum bleibt ein Rest derselben zurück, worauf wieder das Ansaugen des Gemisches und das weitere Spiel beginnt.

Die Steuerung hat demnach innerhalb der Periode von vier Halbhüben folgendes zu leisten:

Bei der Ansaugeperiode wird durch ein Einlaßventil Gas und Luft zugeführt. Die Mischung kann in verschiedener Weise erfolgen. Entweder es ist außer dem Einlaßventil noch ein Gasventil vorhanden (Abbildung 160), das die Gasleitung gegen die Luftleitung abschließt und nur während des Ansaugens öffnet, oder ein sogenanntes Mischventil, das Gas- und Luftzutritt gemeinschaftlich steuert (Abbildung 148). Die Leistung läßt sich durch längeres oder kürzeres Offenhalten des Mischventils oder durch Veränderung der Öffnungsweite und Öffnungsdauer des Gasventils regeln.

Wenn die Saugwirkung am Ende des Kolbenhubes aufhört, schließt sich das Einlaßventil, und die Kompression kann eintreten. Die Zündung am Hubende wird gewöhnlich durch eine Steuerung rechtzeitig eingeleitet. Kurz vor Ende des Arbeitshubes wird das Auslaßventil geöffnet und so lange offen gehalten, bis der Kolben

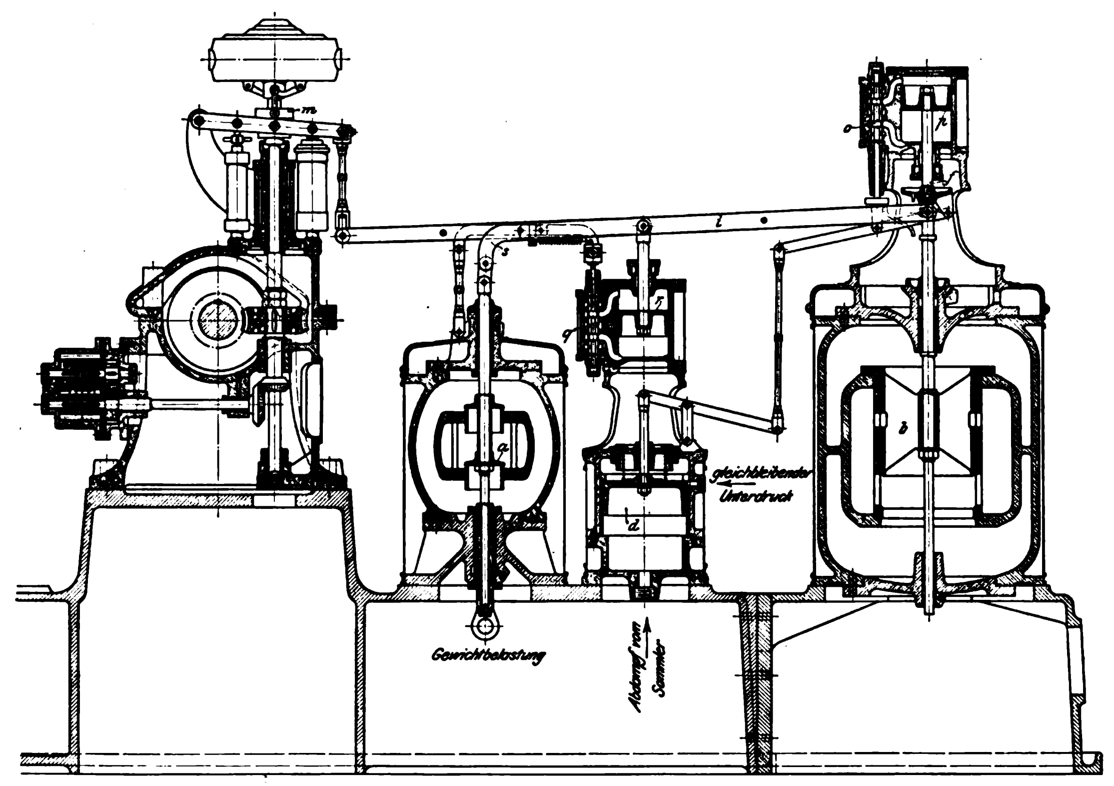


Abbildung 144. Regelung einer Mischturbine (Skodawerke).

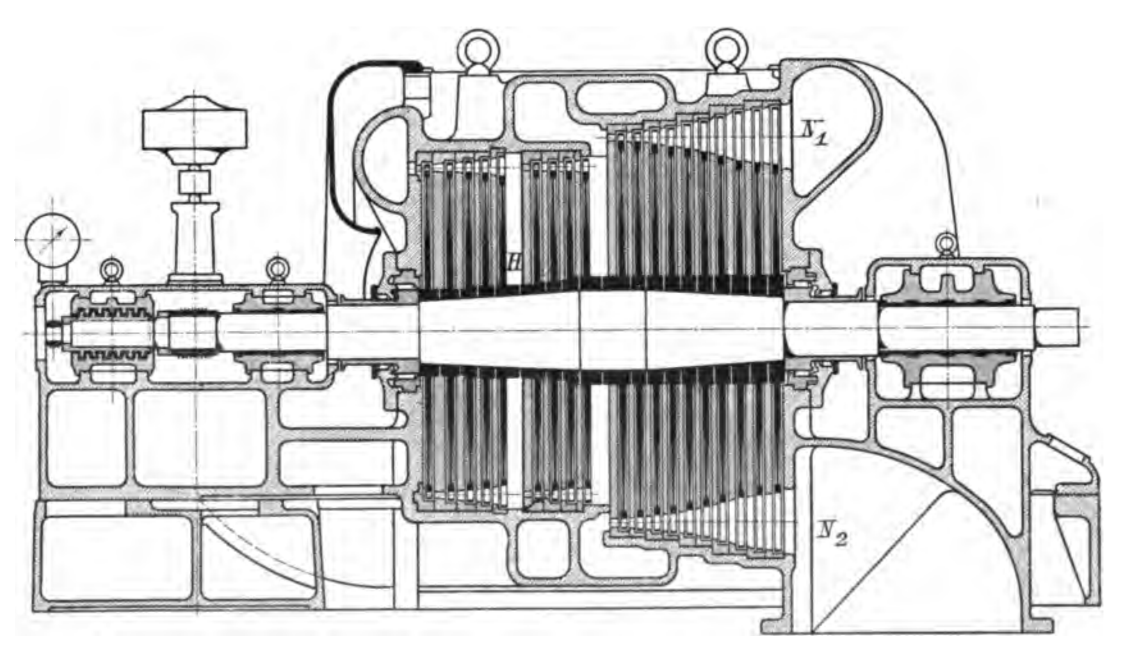


Abbildung 145. Frisch- und Abdampfturbine von Örlikon.

am Ende der Ausschubperiode angelangt ist. Das Auslaßventil muß gesteuert sein, aber Gas- und Eintrittsventil könnten auch selbsttätig ausgeführt werden, meist wird aber der Sicherheit wegen wenigstens das Gas- oder Mischventil gesteuert. Bei großen Maschinen steuert man alle Ventile, besonders bei schnellem Gange ist die Betriebssicherheit gesteuerter Ventile größer. Gas- und Luft-Eintrittsventil sind oft miteinander verbunden.

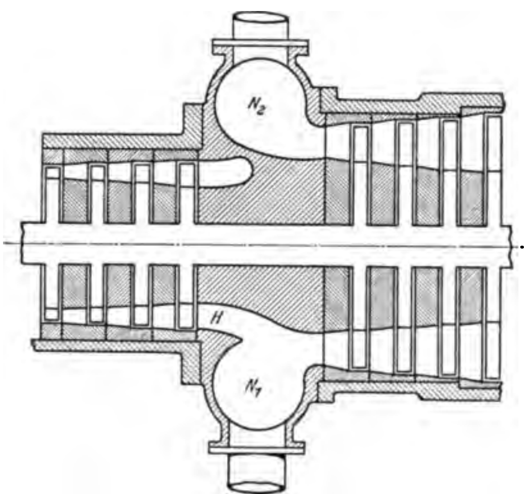


Abbildung 146. Schema einer Frisch- und Abdampfturbine von Örlikon.

Bei vier Halbhüben des Kolbens ist demnach nur einer arbeitsleistend, während die anderen drei Arbeit verbrauchen. Der großen Einfachheit der Maschine steht also als Nachteil der Umstand gegenüber, daß zur annähernd gleichmäßigen Umdrehungsgeschwindigkeit nach unseren Betrachtungen auf S. 137 ein sehr großes Schwungrad notwendig ist, daß ferner die höchsten Kolbendrücke und damit die Abmessungen des Gestänges im Verhältnis zur Leistung bei gegebener Drehzahl sehr groß werden. Diese Mängel können bei größeren Ausführungen unter Verzicht auf die Einfachheit der Anlage durch Anordnung von mehreren Zylindern, die in ihrem Arbeitsvorgang zeitlich gegeneinander verschoben sind, und durch die Einführung doppeltwirkender Zylinder behoben werden; es verbleibt aber die verhältnismäßig geringe Arbeitsleistung für eine Zylinderseite bestehen und noch der ungünstige Umstand, daß die Kompression nicht wie bei Dampfmaschinen jedesmal dem Verzögerungsdruck des Gestänges gegen die Totpunkte hin entgegenwirkt.

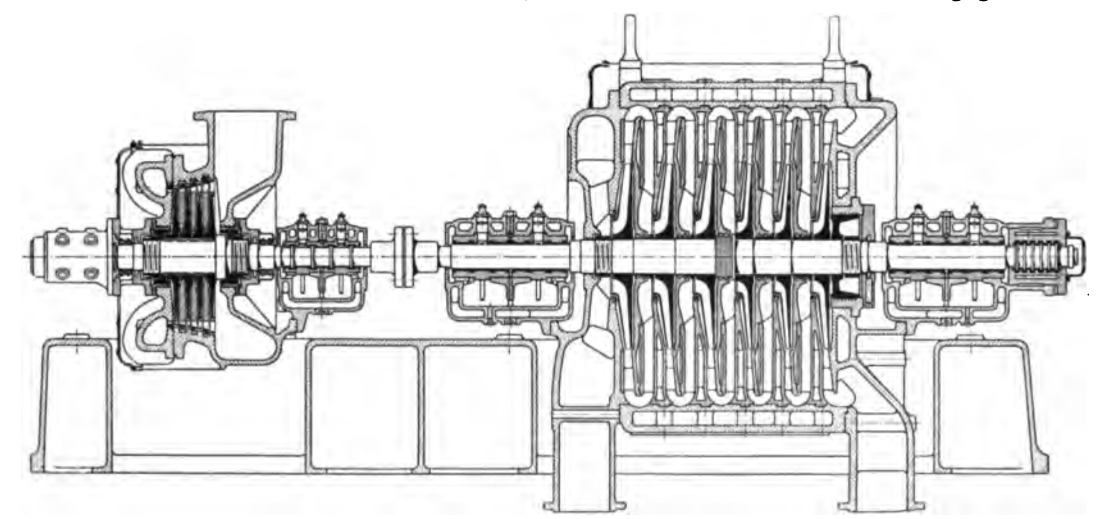


Abbildung 147. Turbokompressor mit Dampfturbinenantrieb (Pokorny & Wittekind).

Ein weiterer Übelstand der Viertakt-Arbeitsweise besteht noch darin, daß die Verdichtung im selben Zylinder stattfindet wie die Verpuffung und Expansion und damit von der letzteren abhängig wird. Beginnt nämlich die Verdichtung im Totpunkte, so

ist damit bei gegebener Zusammensetzung des Gemisches die Endspannung der Expansion schon vorbestimmt, und sie wird verhältnismäßig groß. Endlich kann als Nachteil angeführt werden, daß der im Laderaum nach dem Ausschub verbleibende Rest von verbrannten Gasen zur Verschmutzung der Wände Anlaß gibt.

Der Wirkungsgrad der Verbrennungsmaschinen wird um so günstiger, je höher die Verdichtung getrieben werden kann. Da aber mit der Verdichtung auch eine Steigerung der Temperatur des Gemisches stattfindet, so ist damit der Verdichtungsenddruck beschränkt, weil bei Überschreitung einer gewissen Temperatur eine Vorzündung mit großen und gefährlichen Stößen eintreten würde; die Verpuffung würde schon vor dem Kolbentotpunkt erfolgen, was unbedingt vermieden werden muß. Außer dem Verdichtungsgrad ist aber noch der maximale Verbrennungsdruck in der Ma-

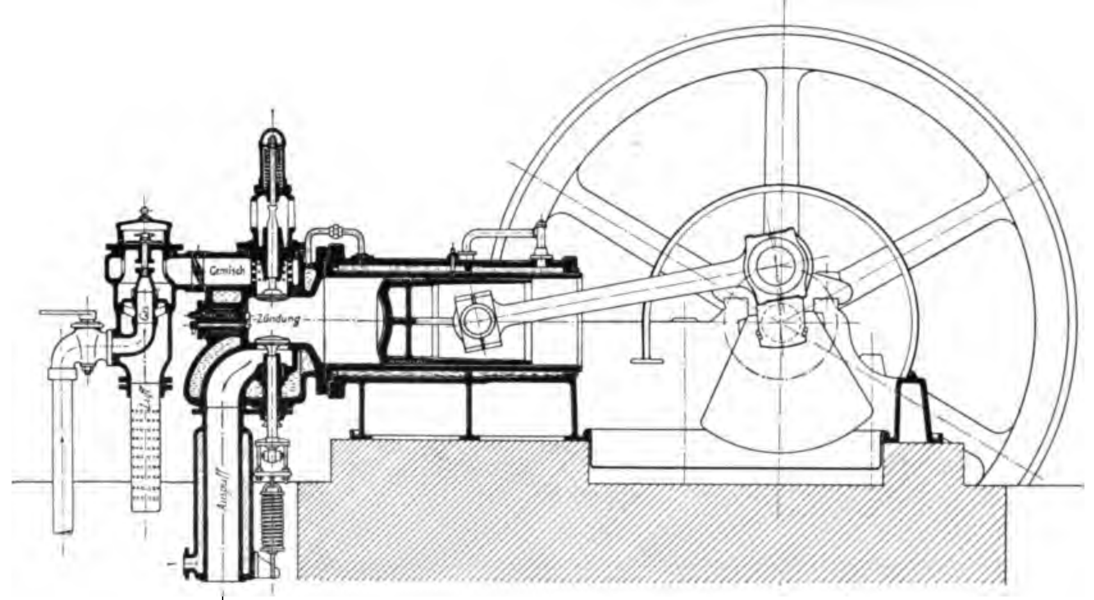
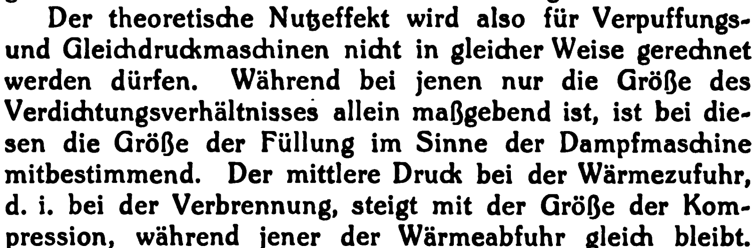


Abbildung 148. Viertakt-Gasmotor von Körting (Schema).

schine beschränkt, denn bei Überschreitung einer gewissen Grenze würde das beim Viertakt ohnehin wenig ausgenutzte Gestänge übermäßig stark, die Zylinderwände zu dick und die Schwungräder zu schwer ausfallen. Außerdem würde die stets nötige Kühlung der Zylinderwände und Deckel allzusehr erschwert werden. Will man daher den Nutzeffekt einer Verbrennungsmaschine bestimmen, so muß man je nach den Verhältnissen als theoretisch möglichen günstigsten Vergleichswert der Leistung jenen annehmen, bei dem sowohl der höchste zulässige Verdichtungsdruck als auch der höchste zulässige Verbrennungsdruck erreicht wird. Dabei sind nun zwei Fälle möglich: entweder der Verdichtungsdruck liegt bedeutend niedriger als der Höchstdruck, es ist bei der Verbrennung also eine beträchtliche Drucksteigerung zulässig, oder Verdichtungs- und Verbrennungsdruck fallen zusammen, es muß also eine Verbrennung bei nahe gleichbleibendem Druck erfolgen. Da nun mit Rücksicht auf die Sätze der Thermodynamik jene Maschine die günstigsten Werte gibt, bei der unter gegebenem Auspuffdruck die Wärmezufuhr bei der höchstmöglichen Temperatur bzw. dem höchstmöglichen Druck erfolgt, so ist im ersten Fall, bei den sogenannten „Verpuffungsmaschinen“ das in Abbildung 149 gestrichelte Diagramm, das die Drücke im Zylinder

bei gegebener Kolbenstellung wie beim Dampfdiagramm vorstellt, die Vergleichsfläche, während die voll ausgezogene Linie die wirkliche Diagrammfläche umschließt.



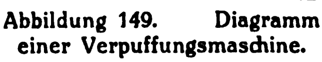


Abbildung 149. Diagramm einer Verpuffungsmaschine.

Im zweiten Fall der sogenannten „Gleichdruckmotoren" ergeben sich die Verhältnisse nach Abbildung 150.

Der theoretische Nutzeffekt wird also für Verpuffungs- und Gleichdruckmaschinen nicht in gleicher Weise gerechnet werden dürfen. Während bei jenen nur die Größe des Verdichtungsverhältnisses allein maßgebend ist, ist bei diesen die Größe der Füllung im Sinne der Dampfmaschine mitbestimmend. Der mittlere Druck bei der Wärmezufuhr, d. i. bei der Verbrennung, steigt mit der Größe der Kompression, während jener der Wärmeabfuhr gleich bleibt. Außer dem genannten, theoretisch begründeten Vorteil der hohen Verdichtung ist aber noch zu berücksichtigen, daß sie einen im Verhältnis zum verdrängten Zylindervolumen kleineren Laderaum erfordert, also auch verhältnismäßig weniger Abkühlung während der Verpuffung bedingt, daß ferner die Zündfähigkeit des Gemisches bei höherem Druck wächst, man also gasärmeres Gemisch verwenden kann. Dies hat wieder kleinere Temperaturerhöhung und geringeren Kühlwasserverlust zur Folge, während die vom Luftüberschuß im Zylinder aufgenommene Wärme bei der Expansion zur Geltung kommt.

Abbildung 150. Diagramm einer Gleichdruckmaschine.

Ein Teil der beim Viertakt auftretenden Mängel wird beim sogenannten Zweitakt vermieden. Im Diagramm (Abbild. 151) bezeichnet A den Punkt, wo die Verbrennungsgase nach Verpuffung und Expansion aus dem Zylinder in das Freie entlassen werden. Nachdem der noch vorhandene Überdruck sich rasch vermindert hat, dringt zuerst Luft von etwas größerem als Atmosphärendruck derart in den Zylinder ein, daß die noch darin befindlichen Verbrennungsgase ausgeschoben werden, also am besten von der der Auspufföffnung entgegengesetzten Seite des Zylinders her. Einen Augenblick später dringt auch verdichtetes Gas ein, und zwar wieder so, daß es nicht bis zu den noch offenen Abströmungslöchern gelangen kann. Etwas nach Kolbenumkehr werden diese zuerst verschlossen und auch der Luft- und Gaszufluß abgesperrt, worauf erst die Verdichtung des Gemisches im Zylinder einsetzt, der wieder Verpuffung und Ausdehnung folgen. Hier wird also bei jedem Hin- und Hergang auf einer Kolbenseite ein Arbeitshub stattfinden, und die Verdichtung ist etwas unabhängiger von der Expansion, ein Umstand, den man bei Vergrößerung der Zylinderabmessungen freilich auch beim Viertakt erreichen kann.

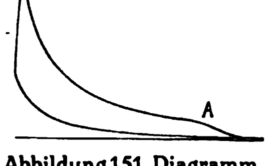


Abbildung 151. Diagramm einer Zweitaktmaschine.

Die Auslaßsteuerung kann hier nicht durch Ventile erfolgen, weil deren Abmessungen bei der geringen Öffnungszeit übermäßig groß ausfallen würden. Auch für die Gas- und Lufteinführung steht bei jedem Umlauf nur wenig Zeit zur Verfügung, man kann demnach die Drehzahl nicht allzusehr steigern, was auch wegen der Spülung nicht möglich ist. Die Abströmöffnungen A liegen der Einströmung E gegenüber, dadurch ergibt sich die Anordnung von Auspuffschlitzen im Zylinderrohr, die vom Kolben selbst gesteuert werden (Abbildung 152).

Die Herstellung der verdichteten Luft und des verdichteten Gases geschieht getrennt in besonderen Ladepumpen, die meist in Tandemanordnung hintereinander-

geschaltet und gemeinsam von einer auf der Hauptwelle sitzenden Kurbel oder der Kolbenstange unmittelbar angetrieben sind. Wenn sie mit besonderer Schieber-

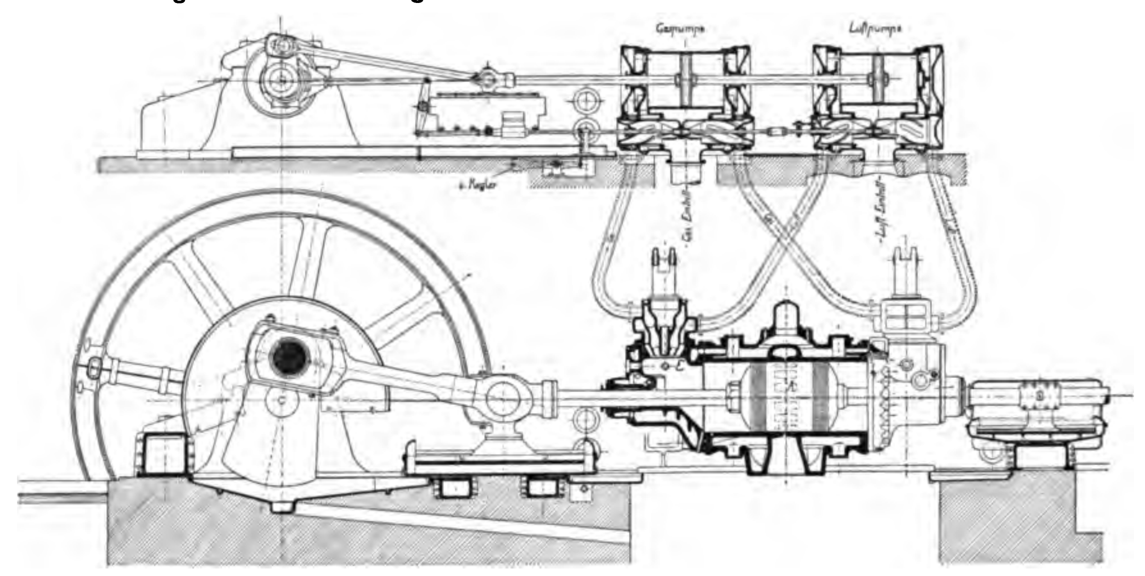


Abbildung 152. Zweitaktmaschine der Siegener Maschinenfabrik.

steuerung versehen sind, können sie zur Steuerung und Regelung des Luft- und Gaseintritts verwendet werden.

Die Zweitaktmaschinen sind verwickelter als einfache Viertaktmaschinen, sie werden deshalb meist nur für größere Ausführungen verwendet, wo sie mit mehrzylindrigen Viertaktmaschinen in Vergleich kommen, oder auch als ventilloser Kleinmotor, wobei der Kolben allein als Steuerorgan und seine ganz dicht eingekapselte Vorderseite als Luftpumpe dient. Doppeltwirkende Zweitaktmaschinen ergeben wie Dampfmaschinen bei jedem Halbhub des Kolbens Arbeit, brauchen also nur kleinere Abmessungen, schwächere Gestänge und leichtere Schwungräder für dieselbe Leistung pro Umdrehung. Die Ladearbeit ist etwas hoch, was den Nutzeffekt vermindert.

Die einzelnen Vorgänge in den Verbrennungszylindern sind nun leicht zu übersehen, sie stimmen im großen und ganzen mit jenen bei der Dampfmaschine überein, wenn auch im Diagramm die Expansions- und Kompressionslinien etwas anderen Verlauf zeigen und zwischen ihnen die Ausschub- und Ansaugelinien liegen. Nur die Verbrennungsperiode gibt Anlaß zu näherer Besprechung. Bei Verpuffungsmaschinen soll während dieser Zeit das vorher eingeführte und verdichtete Gemisch von Brennstoff und Luft möglichst rasch und vollkommen verbrannt werden, damit das theoretische Vergleichsdiagramm für Verbrennung bei gleichbleibendem Volumen angenähert erreicht wird. Als gasförmige Brennstoffe kommen hauptsächlich in Betracht: Leuchtgas, Kraftgas als Druck- oder Sauggas, Gicht- und Koksofengase; als flüssige: Benzin, Petroleum, Benzol, Ergin, Naphtha, Spiritus. Über die Erzeugung von Leuchtgas, Benzol, Benzin und Spiritus sowie über die Entstehung von Gicht- und Koksofengasen ist bereits berichtet worden, auf die Herstellung von Kraftgas und die Reinigung von Gichtgasen soll noch später kurz eingegangen werden. Hier handelt es sich darum, vorerst die Steigerung von Druck und Temperatur bei der Verbrennung zu beurteilen, und zwar vorläufig unter Beibehaltung des Volumens.

bei gegebener Kolbenstellung wie beim Dampfdiagramm vorstellt, die Vergleichsfläche, während die voll ausgezogene Linie die wirkliche Diagrammfläche umschließt.

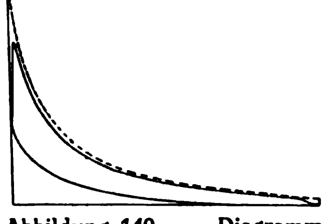
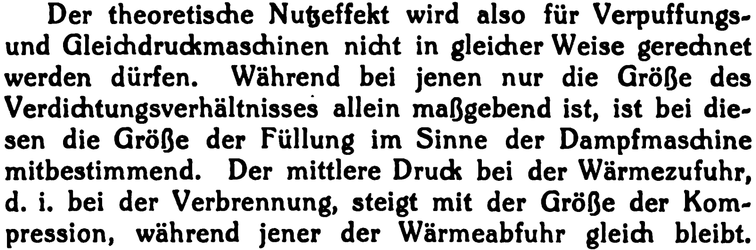


Abbildung 149. Diagramm einer Verpuffungsmaschine.

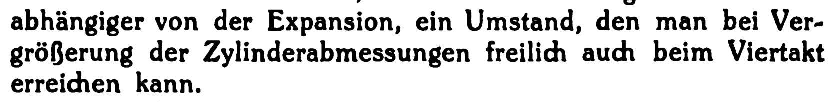


Im zweiten Fall der sogenannten „Gleichdruckmotoren" ergeben sich die Verhältnisse nach Abbildung 150.

Der theoretische Nutzeffekt wird also für Verpuffungs- und Gleichdruckmaschinen nicht in gleicher Weise gerechnet werden dürfen. Während bei jenen nur die Größe des Verdichtungsverhältnisses allein maßgebend ist, ist bei diesen die Größe der Füllung im Sinne der Dampfmaschine mitbestimmend. Der mittlere Druck bei der Wärmezufuhr, d. i. bei der Verbrennung, steigt mit der Größe der Kompression, während jener der Wärmeabfuhr gleich bleibt. Außer dem genannten, theoretisch begründeten Vorteil der hohen Verdichtung ist aber noch zu berücksichtigen, daß sie einen im Verhältnis zum verdrängten Zylindervolumen kleineren Laderaum erfordert, also auch verhältnismäßig weniger Abkühlung während der Verpuffung bedingt, daß ferner die Zündfähigkeit des Gemisches bei höherem Druck wächst, man also gasärmeres Gemisch verwenden kann. Dies hat wieder kleinere Temperaturerhöhung und geringeren Kühlwasserverlust zur Folge, während die vom Luftüberschuß im Zylinder aufgenommene Wärme bei der Expansion zur Geltung kommt.

Abbildung 150. Diagramm einer Gleichdruckmaschine.

Ein Teil der beim Viertakt auftretenden Mängel wird beim sogenannten Zweitakt vermieden. Im Diagramm (Abbild. 151) bezeichnet A den Punkt, wo die Verbrennungsgase nach Verpuffung und Expansion aus dem Zylinder in das Freie entlassen werden. Nachdem der noch vorhandene Überdruck sich rasch vermindert hat, dringt zuerst Luft von etwas größerem als Atmosphärendruck derart in den Zylinder ein, daß die noch darin befindlichen Verbrennungsgase ausgeschoben werden, also am besten von der der Auspufföffnung entgegengesetzten Seite des Zylinders her. Einen Augenblick später dringt auch verdichtetes Gas ein, und zwar wieder so, daß es nicht bis zu den noch offenen Abströmungslöchern gelangen kann. Etwas nach Kolbenumkehr werden diese zuerst verschlossen und auch der Luft- und Gaszufluß abgesperrt, worauf erst die Verdichtung des Gemisches im Zylinder einsetzt, der wieder Verpuffung und Ausdehnung folgen. Hier wird also bei jedem Hin- und Hergang auf einer Kolbenseite ein Arbeitshub stattfinden, und die Verdichtung ist etwas unabhängiger von der Expansion, ein Umstand, den man bei Vergrößerung der Zylinderabmessungen freilich auch beim Viertakt erreichen kann.



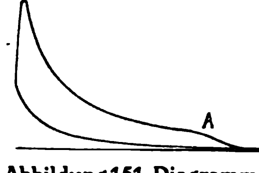


Abbildung 151. Diagramm einer Zweitaktmaschine.

Die Auslaßsteuerung kann hier nicht durch Ventile erfolgen, weil deren Abmessungen bei der geringen Öffnungszeit übermäßig groß ausfallen würden. Auch für die Gas- und Lufteinführung steht bei jedem Umlauf nur wenig Zeit zur Verfügung, man kann demnach die Drehzahl nicht allzusehr steigern, was auch wegen der Spülung nicht möglich ist. Die Abströmöffnungen A liegen der Einströmung E gegenüber, dadurch ergibt sich die Anordnung von Auspuffschlitzen im Zylinderrohr, die vom Kolben selbst gesteuert werden (Abbildung 152).

Die Herstellung der verdichteten Luft und des verdichteten Gases geschieht getrennt in besonderen Ladepumpen, die meist in Tandemanordnung hintereinander-

geschaltet und gemeinsam von einer auf der Hauptwelle sitzenden Kurbel oder der Kolbenstange unmittelbar angetrieben sind. Wenn sie mit besonderer Schieber-

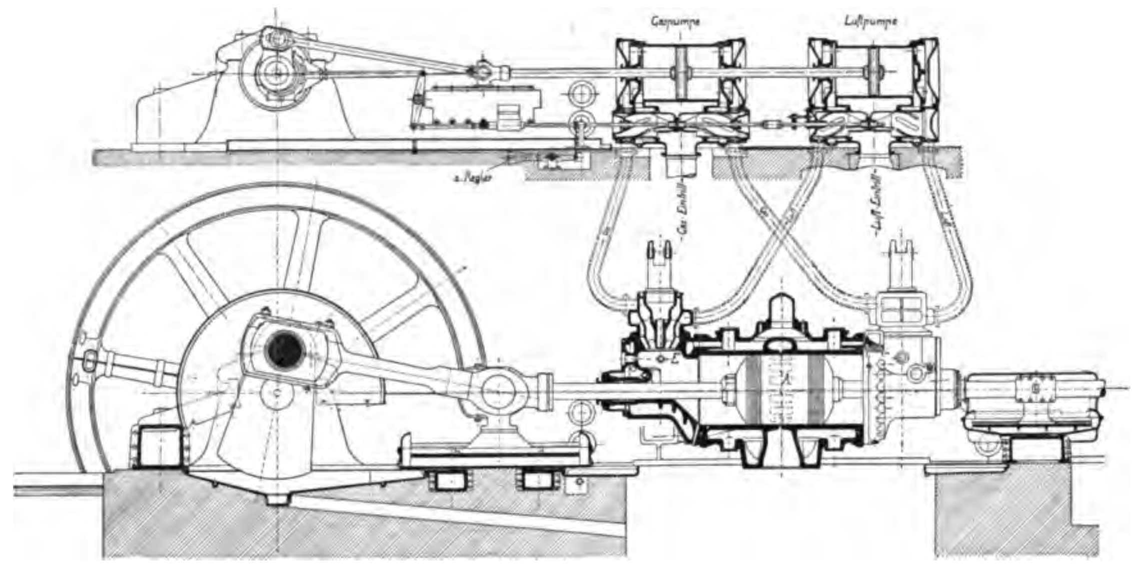


Abbildung 152. Zweitaktmaschine der Siegener Maschinenfabrik.

steuerung versehen sind, können sie zur Steuerung und Regelung des Luft- und Gaseintritts verwendet werden.

Die Zweitaktmaschinen sind verwickelter als einfache Viertaktmaschinen, sie werden deshalb meist nur für größere Ausführungen verwendet, wo sie mit mehrzylindrigen Viertaktmaschinen in Vergleich kommen, oder auch als ventilloser Kleinmotor, wobei der Kolben allein als Steuerorgan und seine ganz dicht eingekapselte Vorderseite als Luftpumpe dient. Doppeltwirkende Zweitaktmaschinen ergeben wie Dampfmaschinen bei jedem Halbhub des Kolbens Arbeit, brauchen also nur kleinere Abmessungen, schwächere Gestänge und leichtere Schwungräder für dieselbe Leistung pro Umdrehung. Die Ladearbeit ist etwas hoch, was den Nutzeffekt vermindert.

Die einzelnen Vorgänge in den Verbrennungszylindern sind nun leicht zu übersehen, sie stimmen im großen und ganzen mit jenen bei der Dampfmaschine überein, wenn auch im Diagramm die Expansions- und Kompressionslinien etwas anderen Verlauf zeigen und zwischen ihnen die Ausschub- und Ansaugelinien liegen. Nur die Verbrennungsperiode gibt Anlaß zu näherer Besprechung. Bei Verpuffungsmaschinen soll während dieser Zeit das vorher eingeführte und verdichtete Gemisch von Brennstoff und Luft möglichst rasch und vollkommen verbrannt werden, damit das theoretische Vergleichsdiagramm für Verbrennung bei gleichbleibendem Volumen angenähert erreicht wird. Als gasförmige Brennstoffe kommen hauptsächlich in Betracht: Leuchtgas, Kraftgas als Druck- oder Sauggas, Gicht- und Koksofengase; als flüssige: Benzin, Petroleum, Benzol, Ergin, Naphtha, Spiritus. Über die Erzeugung von Leuchtgas, Benzol, Benzin und Spiritus sowie über die Entstehung von Gicht- und Koksofengasen ist bereits berichtet worden, auf die Herstellung von Kraftgas und die Reinigung von Gichtgasen soll noch später kurz eingegangen werden. Hier handelt es sich darum, vorerst die Steigerung von Druck und Temperatur bei der Verbrennung zu beurteilen, und zwar vorläufig unter Beibehaltung des Volumens.

Bei der Verbrennung verbinden sich die in den Brennstoffen enthaltenen Atome von Kohlenstoff und Wasserstoff mit dem Sauerstoff der zugeführten Luft, wobei eine große Wärmemenge frei wird. Würde man nur genau so viel Luft zuführen, als die vollständige Verbrennung erfordert, so müßten Druck- und Temperaturerhöhung den größten Wert erreichen; denn wenn weniger Luft vorhanden ist, würden unverbrannte Teile zurückbleiben, wenn zuviel Luft vorhanden ist, muß diese bei der vollen Wärmeabgabe auch noch mit erwärmt werden. Abgesehen von der vor allem erforderlichen Sicherheit der vollkommenen Verbrennung hat also ein großer Luftüberschuß den bereits früher angedeuteten Vorteil, daß die Steigerung der Temperatur und damit die durch das Kühlwasser erforderliche Wärmeabfuhr ohne Arbeitsleistung zur Kühlhaltung der Zylinderwände kleiner wird, die bis zu 50 v. H. der gesamten, überhaupt entwickelten Wärme betragen kann.

Wird jedoch das Verhältnis von Luft und Gas gar zu groß, so hört damit das Gemisch auf, überhaupt rasch und sicher entzündbar zu sein.

Man kann nun aus der Zusammensetzung des Brennstoffes die erforderliche Luftmenge für die vollkommene Verbrennung und die Zusammensetzung und das spe-

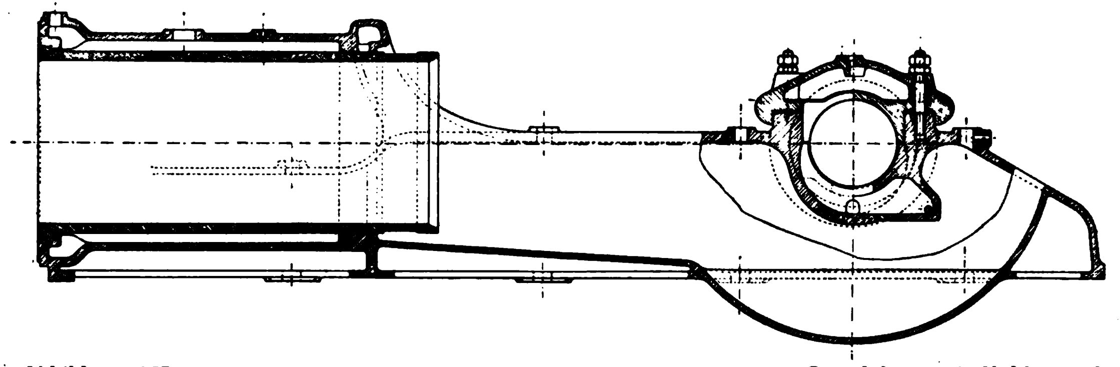


Abbildung 153. Grundplatte mit Kühlmantel.

zifische Volumen der verbrannten Gase finden. Ist auch für die einzelnen Teile, aus denen das Gas zusammengesetzt ist, die Verbrennungswärme bekannt, d. i. die bei der Verbindung mit Sauerstoff freiwerdende Wärmemenge, so kann man den gesamten Heizwert und durch Division mit der mittleren spezifischen Wärme der Abgase auch die Temperaturerhöhung bei gleichbleibendem Volumen finden; das ist freilich nur angenähert möglich, weil die spezifische Wärme nicht konstant ist, sondern von der Temperatur und vielleicht auch vom Druck abhängig ist. Den wahren Heizwert bestimmt man gewöhnlich auf praktische Weise mit dem Junkerschen Kalorimeter.

Es zeigt sich, daß der Heizwert des verwendeten Brennstoffes nicht unmittelbar und unabhängig die Leistung der Maschine bestimmt, sondern daß auch Luftüberschuß und Verdichtung maßgebend sein werden. Nachdem z. B. Gichtgas für ein Kubikmeter nur etwa $\frac{1}{4}$ des Heizwertes von Leuchtgas besitzt, jedoch nur $\frac{1}{5}$ der Luftmenge zur vollständigen Verbrennung und außerdem nur einen viel geringeren Luftüberschuß benötigt, so brauchen die Abmessungen der Gichtgasmaschinen nur rund 20 v. H. größer zu sein als die der Leuchtgasmaschinen gleicher Leistungsfähigkeit.

Die Bestimmung der Kolbenkräfte und Schwungradgewichte erfolgt entsprechend den bereits bei Dampfmaschinen besprochenen Andeutungen.

Die meisten Maschinen für gasförmige Brennstoffe werden liegend gebaut, nur bei einzelnen Formen mit Verwendung flüssiger Brennstoffe wird bisher die stehende

Anordnung bevorzugt. Bei Viertaktmaschinen werden zumeist besondere Kreuzköpfe nur verwendet, wenn doppeltwirkende Kolben mit Stange und Stopfbüchse vorhanden sind, sonst benutzt man gewöhnlich Tauchkolben, die gleichzeitig die Führung bilden. Außerdem sind für die Konstruktion der Zylinder besonders die Anordnung der Ventile und die Ausführung des Wassermantels maßgebend. Letzterer umschließt das eigentliche Zylinderrohr derart, daß es sich in achsialer Richtung frei ausdehnen kann; sehr oft werden bei kleineren, einfachwirkenden Maschinen die Umhüllung des Wassermantels und das Gestell aus einem Stück gegossen (Abbild. 153 u. 174). Nur bei manchen doppeltwirkenden Maschinen wird der Mantel aus einem Stück mit dem Zylinderrohr gegossen (Abbildung 154), wobei jedoch wegen der Vermeidung von Spannungen und Formänderungen durch Temperaturunterschiede oft besondere Vorsichtsmaßregeln angewendet erscheinen (Abbildung 155; vgl. auch Abbildung 166).

Abbildung 154. Nürnberger Großgasmaschine, ausgeführt von den Skodawerken.

Der Verdichtungsraum ist bei einfachwirkenden, liegenden Maschinen gewöhnlich als besonderer Zylinderkopf ausgebildet. Diese Köpfe zeigen leicht die Neigung, durch Wärmedehnungen zu reißen, und es gehört daher eine besondere

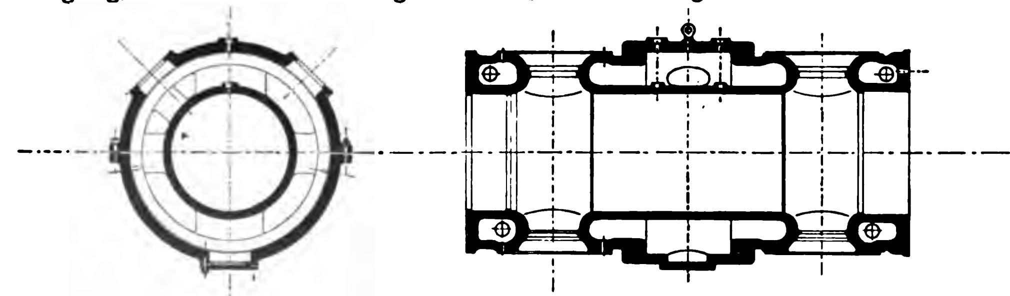


Abbildung 155. Zylinder einer Großgasmaschine der Deutzer Maschinenfabrik.

Erfahrung dazu, sie richtig zu formen, ihre Wandstärken entsprechend zu wählen und insbesondere auch die Kühlung gut anzubringen.

Bei doppeltwirkenden Maschinen wird der Verdichtungsraum entweder unmittelbar im Zylinder angebracht (vgl. Abbildung 154 u. 178) oder auch seitlich angeordnet (Abbildung 156 u. 178) oder kombiniert (Abbildung 169). Manchmal werden die Zylinder auch ausgebüchst. Abbildung 157 und 174 zeigen die Anordnung der Ventile bei stehenden Maschinen.

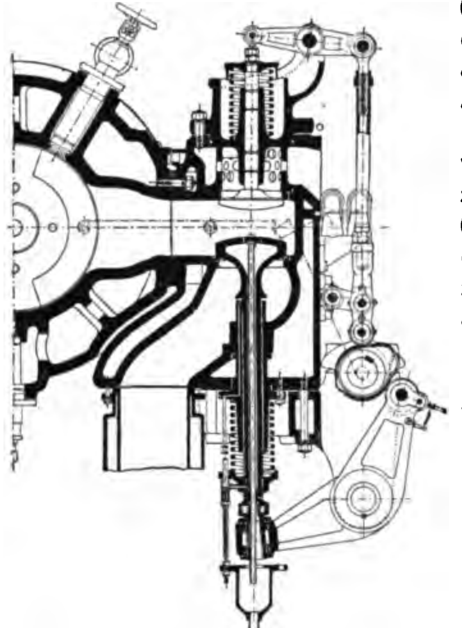


Abbildung 156. Steuerung von Körting.

Bei großen doppeltwirkenden Viertaktmaschinen vereinigt man Kreuzkopfführung und Kurbellager zum Rahmengestell mit Flach- oder Rundführung (Abbild. 158 u. 178). In ersterem Falle ist wegen der zentrischen Kräfteverteilung oft eine Zugstange zwischen Lager und Zylinder oberhalb der Achse angebracht. Die Zylinder ruhen auf angegossenen Füßen oder sind zwischen Kreuzkopfführung, Zwischenstück und hinterer Führung aufgehängt, wobei wie bei Dampfzylindern auf die freie Ausdehnung in wechselnder Temperatur geachtet werden muß. Die hintere Kolbenstangenführung ist auf dem Fundament unmittelbar aufgestellt und zentrisch mit dem Gaszylinder verbunden (vgl. Abbild. 159 u. 178). Manchmal findet man durchgehende seitliche Rahmen, auf denen Kreuzkopfführung, Zylinder und hintere Führung angebracht sind (Abbildung 152 u. 180). Bei zwei hintereinanderliegenden Zylindern werden diese durch das genannte Zwischenstück, das auf dem Fundament steht, verbunden, wobei sich das freie Aufhängen der Zylinder am leich-

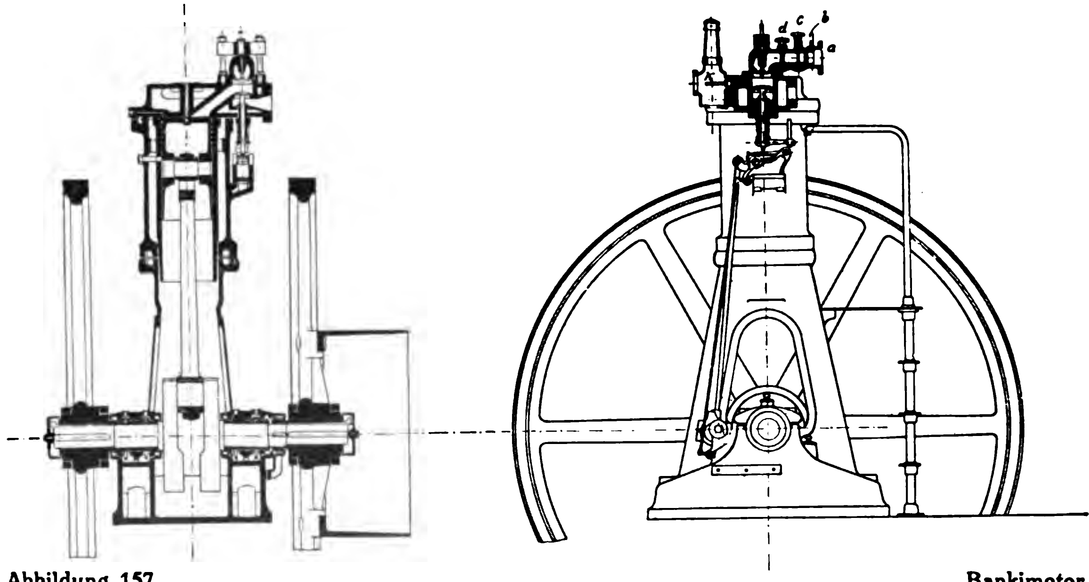
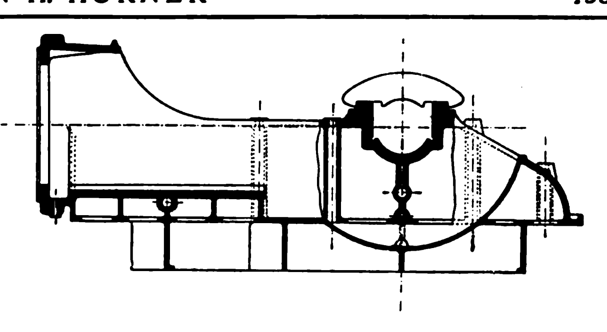


Abbildung 157. Bankimotor.

testen ergibt (Abbildung 159); es hat den Vorteil der guten Zugänglichkeit untenliegender Ventile und Rohranschlüsse. Die Anordnung mehrerer Zylinder erfolgt auch

nebeneinander mit doppelt gekröpfter Welle.

Für die Konstruktion der Zylinder ist vor allem die Ausbildung der Ventile maßgebend. Ein- und Auslaßventile sind meist einsitzige Tellerventile; die mittlere Geschwindigkeit im Spalt, auf die Kolbenverdrängung bezogen, ist etwa mit 40 bis 60 m-sek zu bemessen, wobei aber auf kleine Hübe mit Rücksicht auf ruhigen Gang gesehen werden muß. Wenn, wie oben erwähnt, Einlaß- und Gasventil miteinander in Verbindung stehen, ist es vorteilhaft, eine kleine Verschiebung derselben gegeneinander zu ermöglichen, damit sicher beide Sitzflächen abdichten können (Abbild. 160). Die Verbindung wird durch Feder und Anschlag hergestellt.



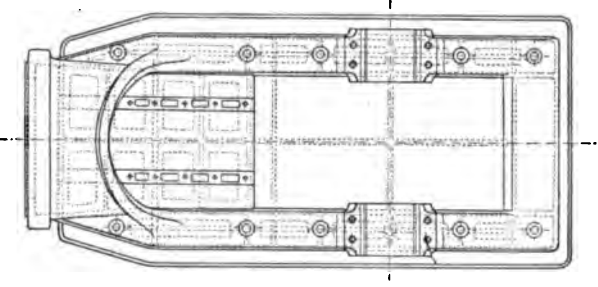


Abbildung 158. Grundplatte der Deutzer Maschinenfabrik.

Mischventile sind oft derart gebaut, daß in der Sitzfläche des einfachen Tellerventils die Öffnungen für die Gaszuströmung liegen, besser aber derart, daß das Verhältnis der Querschnitte für Gas und Luft auch im Ventilspalt gleich bleibt (Abbildung 148 und 161). Als Mischventil dient manchmal ein Doppelsitzventil (Abbildung 164 u. 166) oder ein Kolbenschieber (Abbildung 165 u. 169).

Die Einlaßventile werden durch den Zutritt frischer Füllung stets genügend kühl gehalten, beim Auslaßventil hingegen sind gewöhnlich besondere Kühlvorrichtungen nötig, weil an ihnen nur die heißen Abgase vorbeistreichen. Man sucht sie wohl manchmal so zu legen, daß auch der Strom der frischen Gase an ihnen vorübergeht; bei größeren Ausführungen genügt das jedoch nicht: dann werden Ventilsitze und oft auch die Ventile selbst hohl ausgeführt und von Kühlwasser durchflossen. Gekühlte Auslaßventile werden aus Bronze hergestellt (Abbild. 164), während ungekühlte Ven-

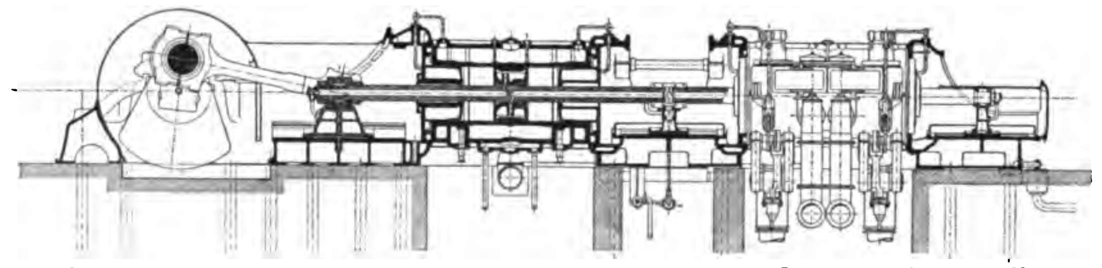


Abbildung 159. Großgasmaschine von Körting.

tile wie Einlaßventile aus Stahl mit der Spindel aus einem Stück gedreht (Abbild. 172) oder vernietet werden (Abbild. 163).

Die Kolben werden möglichst einfach hergestellt, meist mit selbstspannenden Ringen. Tauchkolben (Abbildung 148) sind wegen ihrer gleichzeitigen Verwendung als Kreuzkopfführungen entsprechend lang auszubilden. Bei doppeltwirkenden Ma-

schinen werden die Kolben etwa wie bei Dampfmaschinen hergestellt, nur müssen sie gekühlt werden (Abbildung 159 u. 162).

Wie bereits erwähnt, müssen bei Viertaktmaschinen die Steuerungsorgane so bewegt werden, daß sie ihre Funktion bei je zwei Umdrehungen der Hauptwelle nur einmal erfüllen. Dies wird gewöhnlich dadurch bewirkt, daß die zum Antrieb der Steuerung dienende Steuerwelle nur die Hälfte der Umdrehungen macht wie die Kurbelwelle, was meist durch Zwischenschaltung von Schraubenrädern erreicht wird. Für kleine Ausführungen sind auch Schaltvorrichtungen mit abwechselndem Eingriff verwendet worden, sie sind aber zu verwickelt, um die erstgenannte Einrichtung mit Steuerwelle zu ersetzen.

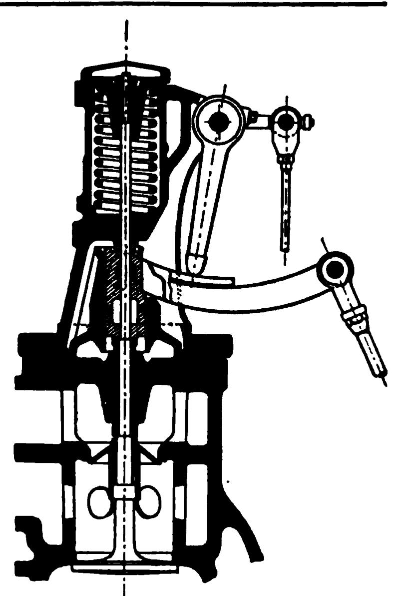


Abbildung 160. Mischventil der Deutzer Maschinenfabrik.

Der Antrieb der Ventile von der Steuerwelle aus erfolgt gewöhnlich durch unrunde Scheiben mit Rollen oder bei großen Maschinen mit Exzentern in Verbindung mit Wälzhebeln oder Ausklinkmechanismen. Die gewöhnliche Anordnung bei kleinen Einheiten zeigt Abbildung 163. Bei größeren Maschinen wird der Auslaßhebel nicht mehr unmittelbar von der unrunden Scheibe angetrieben (Abbildung 164). Ein Beispiel für den Exzenterantrieb mit Wälzhebeln bietet Abbildung 165; statt der Wälzhebel werden auch Kniehebel angewendet (Abbildung 166), um das Öffnen des Einlaßventils bei etwa im Zylinder durch die Regelung auftretendem Vakuum zu verhindern. Endlich ist in Abbildung 167 und 169 eine Exzentersteuerung mit Wälzhebeln und Auslösemechanismus dargestellt.

Abbildung 161. Mischventil von Körting.

Die Zündung ist ursprünglich durch offene Flammen, dann durch gesteuerte oder auch ungesteuerte Glührohre aus Metall oder Porzellan eingeleitet worden. Diese Einrichtungen sind aber fast durchweg von der elektrischen Zündung verdrängt worden. Diese kann wieder als Kerzenzündung oder als Abreißzündung ausgeführt werden. Die erstere Art besteht darin, daß innerhalb des Zylinders zwei Elektroden, die um etwa $\frac{1}{2}$ bis 1 mm voneinander entfernt sind, angebracht werden. Zur gewünschten Zündungszeit wird ein hochgespannter Strom zugeführt, wodurch eine Reihe von Funken überspringt und die Entflammung herbeiführt.

Viel mehr eingebürgert hat sich die sogenannte Abreißzündung. Sie besteht darin, daß im Verbrennungsraum plötzlich durch einen außerhalb betätigten Auslösemechanismus ein Stromkreis geöffnet wird. Der Öffnungsfunke er-

fordert nur geringe Stromspannung von 50 bis 100 Volt. Als Stromquelle werden gewöhnlich kleine Magnetmaschinen benutzt, weil man hier keinen kontinuierlichen Strom braucht und denselben daher vorteilhaft nur im Augenblick der Verwendung durch eine rasche Bewegung des Ankers erzeugt. Abbildung 168 zeigt die Anordnung eines Abreißmechanismus und den äußeren Antrieb desselben in der verbreiteten Ausführung von Bosch. Der Strom wird dem isolierten Bolzen a zugeführt und durch c und d sowie das Metall des Deckels an die Stromquelle zurückgeleitet. Der auf der Steuer-

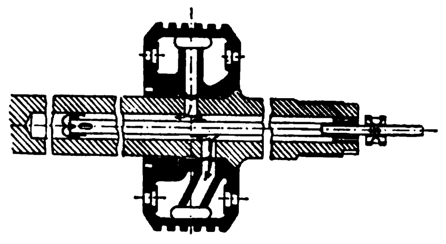

Abbildung 162. Kolben mit Kühlung.

Abbildung 163. Steuerung für kleine Einheiten (Deutzer Maschinenfabrik).

welle sitzende Daumen f bewegt den durch zwei Spiralfedern belasteten T-förmigen Hebel und damit die den ruhenden Anker umgebende Hülse h aus weichem Eisen,

bis die Berührung zwischen Daumen und Hebel aufhört und die Federn zur Wirksamkeit gelangen. Der Hebel schnellt dann zurück, erzeugt in der Magnetmaschine

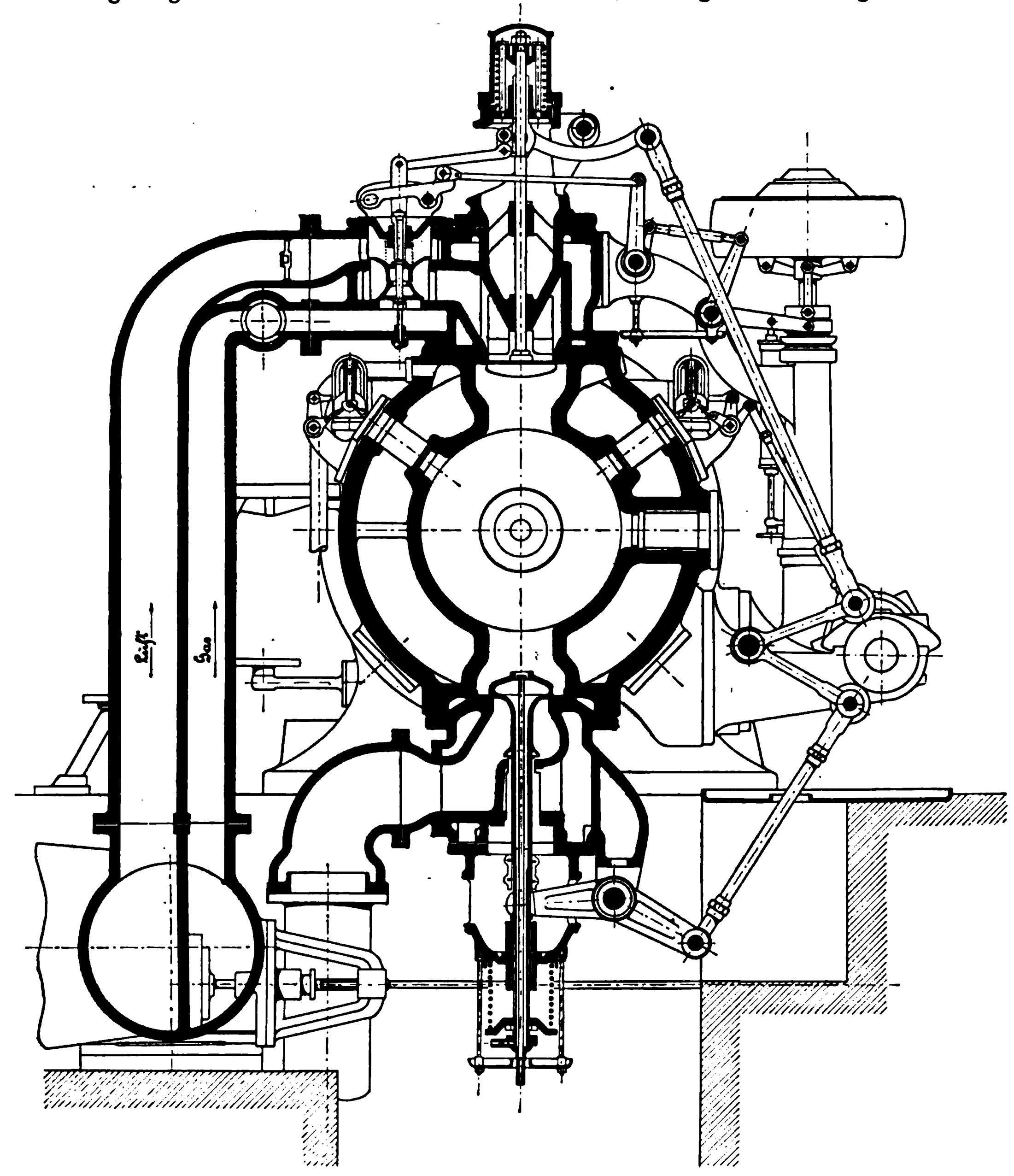


Abbildung 164. Steuerung für große Einheiten (Deutzer Maschinenfabrik).

Strom und bewirkt durch Anprall der Stange s an den Bolzen des Hebels d das Abreißen des Kontakts.

Sind mehrere Zündstellen vorhanden, so ergibt sich eine verwickelte Anlage, weshalb man für diesen Fall besondere Einrichtungen für die Stromverteilung getroffen

hat. Jedenfalls strebt man an, den Zeitpunkt der Zündung etwas verstellen zu können, um die Zeit zwischen Zündung und Entflammung, die entsprechend dem Gemisch und der Umdrehungszahl verschieden sein soll, ändern zu können; manchmal wird der Zündungszeitpunkt auch vom Regler beeinflußt, meist aber nur von Hand eingestellt. Bei sehr großen Maschinen werden zur Sicherheit der raschen Entflammung zwei Zündstellen in jeder Zylinderhälfte angewendet.

Die Regelung kann auf verschiedene Art erfolgen. Man kann erstens nur den Gaszufluß vermindern; das ist jedoch nur bis zu einem gewissen Grade möglich, weil sonst das Gemisch zu wenig zündfähig würde und daher unverbrannt und ohne Arbeitsleistung ausströmen müßte. Es könnte sogar geschehen, daß die Verbrennung zwar eintritt, aber so verlangsamt wird, daß sie auch nach der Ausschubperiode noch nicht beendet ist, so daß sich das neu eintretende Gemisch an den Rückständen im Verdichtungsraum vorzeitig entzündet, wodurch unzulässige Stöße entstehen. Bei dieser Gemischregelung wird der Nutzeffekt wegen Verlangsamung der Verbrennung herabgesetzt.

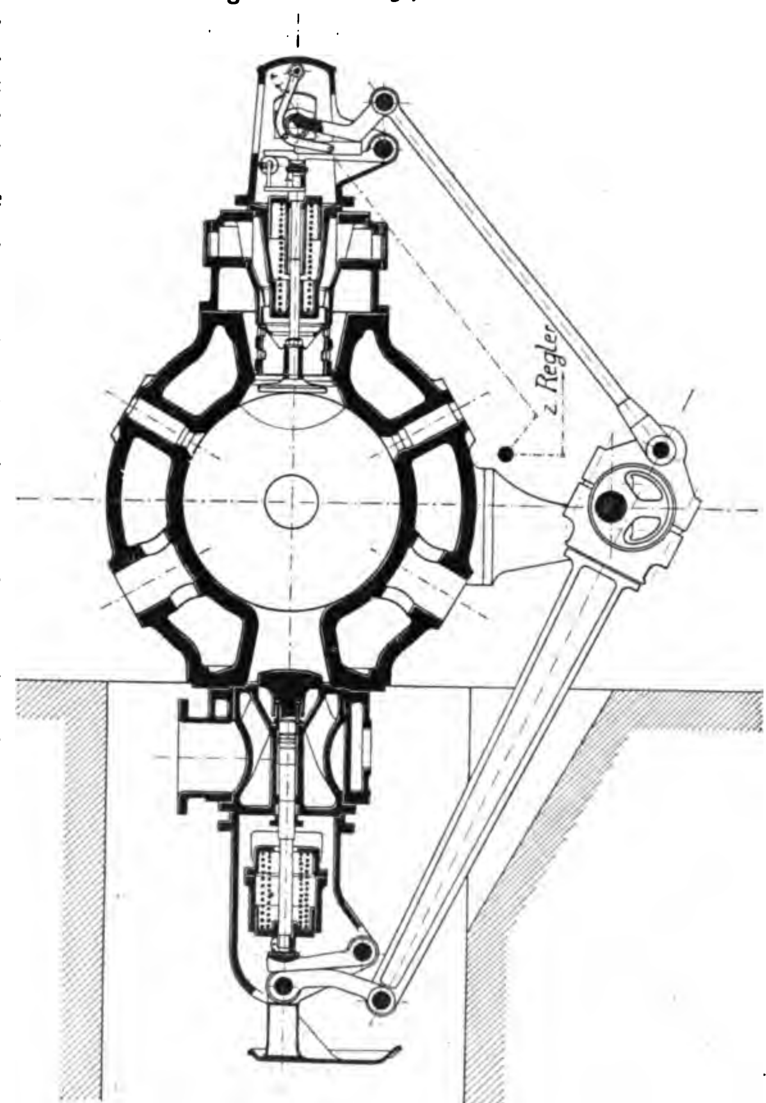


Abbildung 165. Nürnberger Großgasmaschine, ausgeführt von den Skodawerken.

Um daher das theoretisch günstigste Diagramm auch bei Verminderung der Leistung beibehalten zu können, hat schon Otto statt der Drosselung des Gaszuflusses die zeitweilige vollständige Absperrung desselben angewendet und dadurch einzelne Arbeitshübe entfallen lassen; dann saugt die Maschine nur Luft an, die nach der Kompression ohne Arbeitsleistung wieder expandiert. Die Einleitung solcher Aussetzer ist sehr einfach, indem der Steuerhebel für das Gasventil von einer achsial verschiebbaren unrunden Scheibe betätigt wird. Wenn der Regler sie so weit verrückt, daß der Nocken die Rolle am Hebel nicht

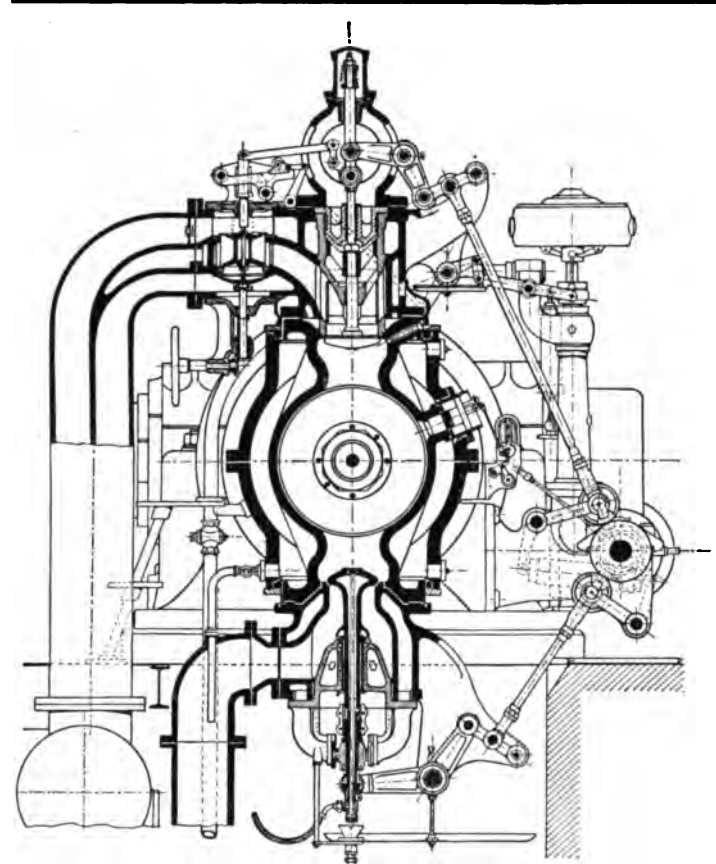


Abbildung 166. Steuerung der Deutzer Maschinenfabrik.

mehr trifft, bleibt das Gasventil bei der Drehung der Steuerwelle geschlossen. Dies ist auch bei der entgegengesetzten Verschiebung des Daumens im Falle des Stillsetzens der Maschine der Fall, damit dann in keiner Lage das Gasventil geöffnet bleiben kann. Diese Regelung ist im Prinzip vielfach beibehalten worden.

So günstig sie auch in wärmetheoretischer Hinsicht ist, so kann sie doch bei größeren Ausführungen nicht gut verwendet werden, weil die Unregelmäßigkeit des Ganges, die ohnehin beim Viertakt schon als Schwierigkeit empfunden wird, allzu störend werden und übermäßige Schwungräder erfordern würde. Die zuerst erwähnte Gemischregelung ist deshalb insbesondere dort wieder aufgenommen worden, wo arme Gase in Verwendung stehen, wo also die Gasmenge im Verhältnis zur zugeführten Luft groß ist und daher Änderungen nicht so ins Gewicht fallen wie etwa bei Leuchtgasmaschinen. Bei der dort anzuwendenden hohen Verdichtung und sicheren Zündvorrichtungen treten jene Nachteile in den Hintergrund. Die Ausführung erfolgt gewöhnlich so, daß das gesteuerte Gasventil unter Einfluß des Reglers früher oder später schließt. Das hat den Nachteil, daß zuletzt nur Luft zugesaugt wird und an der Zündstelle das ärmste Gemisch vorhanden ist. Die Steuerung des Gasventils ist dabei der der Dampfventile ähnlich (Abbild. 167).

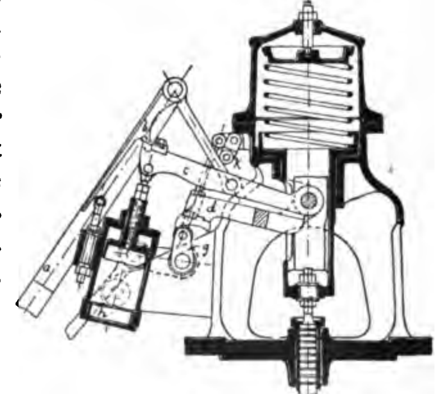
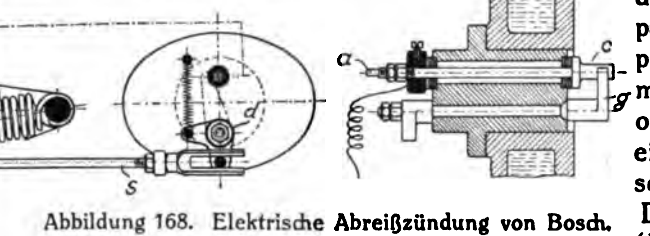


Abbildung 167. Steuerung der Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg.

Die Exzenterstange a bewegt den Wälzhebel c, solange der Eingriff der Klinke b dauert. Der zweite Wälzhebel d wird insofern vom Regler beeinflußt, als sein Ende durch den Hebel g gehoben oder gesenkt wird, wodurch die Auslösung früher oder später erfolgt und auch der Hub des Ventils veränderlich gemacht wird. Die vom Regler verstellte Rolle k bildet eine Hubbegrenzung für den Ventilhebel c, damit er nicht infolge seiner Masse zu weit ausschwingt. h ist ein Luftpuffer zur Einstellung und Mäßigung des Ventilschlags.

Eine dritte Art der Regelung besteht darin, daß man die Zusammensetzung des Gemisches unverändert läßt, aber die zugeführte Menge veränderlich macht (Füllungsregelung). Dies kann durch früheres Schließen des Einlaßventils bewirkt werden, dem während des noch übrigen Teils der Ansaugeperiode eine Expansion des Gemisches folgt oder auch durch einfache Drosselung mittels Drosselklappe (Abbildung 172) oder Hubveränderung des Einlaßventils (vgl. Abbild. 163 und 164) oder Mischventils. In jedem Falle aber verändert sich dabei der Verdichtungsgrad unter Verminderung des Nutzeffekts. Die Zündfähigkeit des Gemisches bleibt aber bis zum Leerlauf erhalten, da die Änderung der Verdichtung darauf keinen so bedeutenden Einfluß ausübt. Endlich kann man Gemisch- und Füllungsregelung kombinieren, indem der Regler gleichzeitig auf eine Drosselklappe zwischen Misch- und Einlaßventil und auf Absperrungen in der Luft- und Gasleitung einwirkt, bei den letzteren in entgegengesetztem Sinne, so daß bei Mehrbelastung mehr Gas und weniger Luft zugeführt wird.



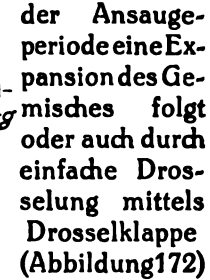


Abbildung 168. Elektrische Abreißzündung von Bosch.

Um bei gleichbleibender Verdichtung doch die Zündbarkeit für kleinere Belastungen zu wahren, wendet Reinhard die in Abbildung 169 dargestellte Regelung an. Wird das Einlaßventil geöffnet, so hebt sich der darüber befindliche Kolbenschieber, es tritt zuerst Luft durch den Schlitz a in den Zylinder, weil die Drosselklappen d und e noch geschlossen sind. Dann werden diese geöffnet und lassen auch Gemisch durch b und c eintreten, bis durch

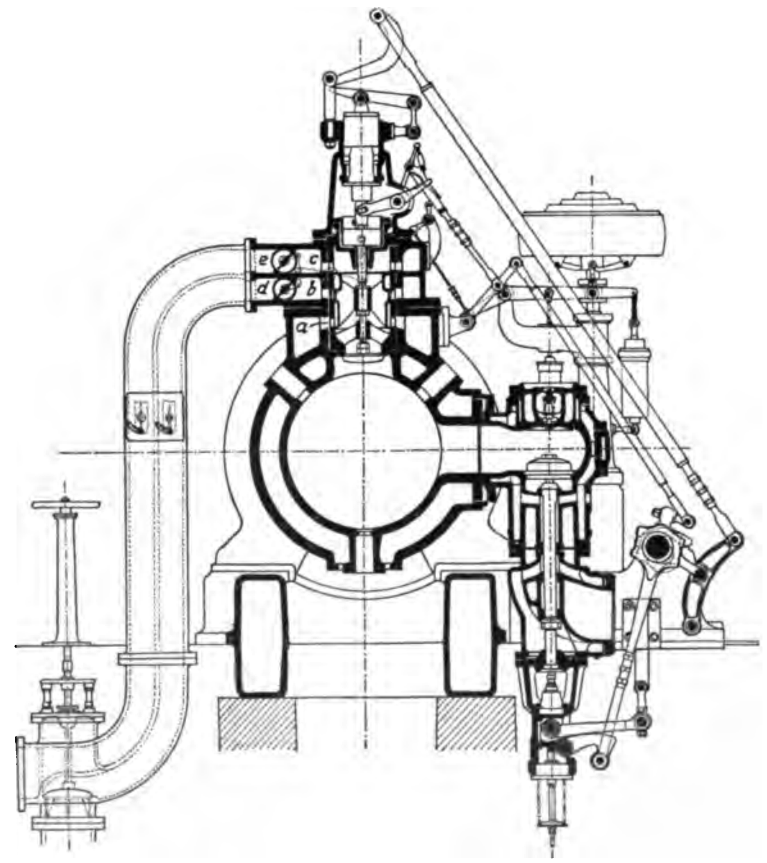


Abbildung 169. Steuerung von Schüchtermann & Kremer.

eine Auslösesteuerung der Kolbenschieber herunterfällt und die Zufuhr von reiner Luft durch a abschließt, während nur mehr Gemisch einströmt; die Drosselklappen stehen mit dem Einlaßventil in Verbindung, sind also hierbei noch geöffnet. Es wird also während der ganzen Saugperiode angesaugt, aber zuerst nur Luft und zuletzt nur Gemisch, so daß an der Zündstelle genügend reiches Gas vorhanden ist.

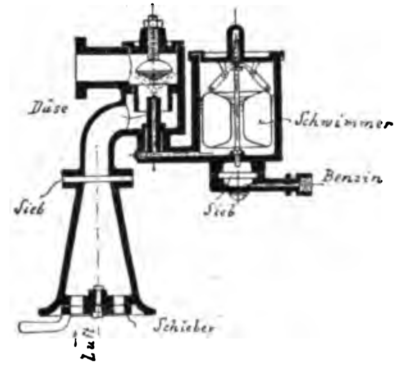


Abbildung 170. Spritzvergaser von Daimler.

Als Regler werden meist die auch im Dampfmaschinenbau angewendeten Konstruktionen benutzt; nur bei Aussetzerregelung werden vielfach auch hin und her gehende Schwungmassen als Pendel verwendet, deren Ausschlag mit der Geschwindigkeit veränderlich ist. Zum Anlassen der Gasmaschinen sind bei größeren Ausführungen besondere Vorrichtungen erforderlich, in Form eigener motorischer Antriebe oder aufgespeicherter Druckluft.

Benutzt man statt der gasförmigen flüssige Brennstoffe, so müssen diese vor der Entflammung möglichst fein in der Luft verteilt und so dem gasförmigen Zustand wenigstens ähnlich gemacht werden. Dabei wird zuerst nicht die Verbrennungsluft in genügender Menge zugeführt, das geschieht erst in der auch bei gasförmigen Brennstoffen gebräuchlichen Weise knapp vor dem Zylinder, weil auf diese Art die Regelung des Gemischverhältnisses leichter und die Gefahr der Entzündung im Zuführungsrohr geringer ist. Bei Benzin, Benzol und Ergin ist hierbei keine Schwierigkeit vorhanden, Petroleum ist viel schwerer vorzubereiten und wird daher zumeist in den später zu behandelnden Gleichdruckmaschinen verwendet. Spiritus ist gut zu benutzen, nur meist zu teuer.

Zur Erzeugung des Gemisches von Luft und Brennstoffdampf oder des Nebels von Brennstoffteilchen benutzt man die sogenannten Vergaser. Bei Benzin würde es genügen, Luft durch dasselbe in Blasenform hindurchzutreiben, wodurch die Verdunstungsoberfläche genügend groß wird (Oberflächenvergaser). Hierzu werden auch Dochte verwendet. Hierbei ergibt sich der Nachteil, daß zuerst nur die leichteren Teile des Brennstoffes verdunsten und eine Änderung der Zusammensetzung desselben nach und nach eintritt. Für schwerere Brennstoffe ist der Oberflächenvergaser wegen ungenügender Verdunstung ohnehin nicht zu benutzen, man ist deshalb meist dazu übergegangen, den Brennstoff mechanisch in der Luft zu zerstäuben (Einspritzvergaser). Bei sehr schweren Brennstoffen muß dann auch noch durch eine Heizung dafür gesorgt werden, daß sich die Brennstoffbläschen nicht allzu leicht wieder absondern; diese Heizung geschieht durch die Abgase der Glührohrzündung, wenn eine solche vorhanden ist, durch einen Teil der Maschinenabgase oder auch durch das erwärmte Kühlwasser. Da diese Heizung beim Anlassen der Maschine noch nicht möglich wäre, geschieht dies gewöhnlich zeitweise mit leichteren Brennstoffen, die erst durch eine Umschaltung durch den eigentlichen Brennstoff ersetzt werden. Die Zerstäubung geschieht durch Ansaugen des Brennstoffs durch eine Düse zugleich mit der Verbrennungsluft und durch Anprallen des Flüssigkeitsstrahls an eine Zerstäuberplatte (Abbildung 170) oder durch ein sogenanntes Zerstäuberventil (Abbildung 171). Das Benzin kommt aus dem hochstehenden Behälter entsprechend der Öffnung des Ventilsitzes a durch die Boh-

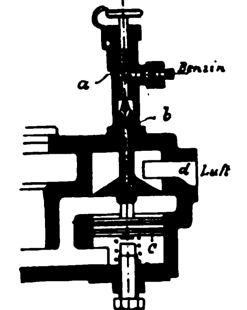


Abbildung 171. Spritzvergaser von Körting.

rung b des Ventils und wird am Umfang der Platte desselben in einem Schleier ausgespritzt. Die Luft tritt bei d zu und reißt die Teilchen aus diesem Schleier mit. Der federbelastete Kolben c schützt das Ventil vor Schwingungen. Bei Spiritus oder Petroleum soll noch eine Heizung beigefügt werden, sie darf aber nicht über ein gewisses Maß getrieben sein, weil durch die Ausdehnung der Brenngase die Leistungsfähigkeit des Zylinders sinkt. Benutzt man die Abgase der Maschine zur Heizung, so kann man nur einen Teil verwenden, während der übrige frei abströmt. Als Bei-

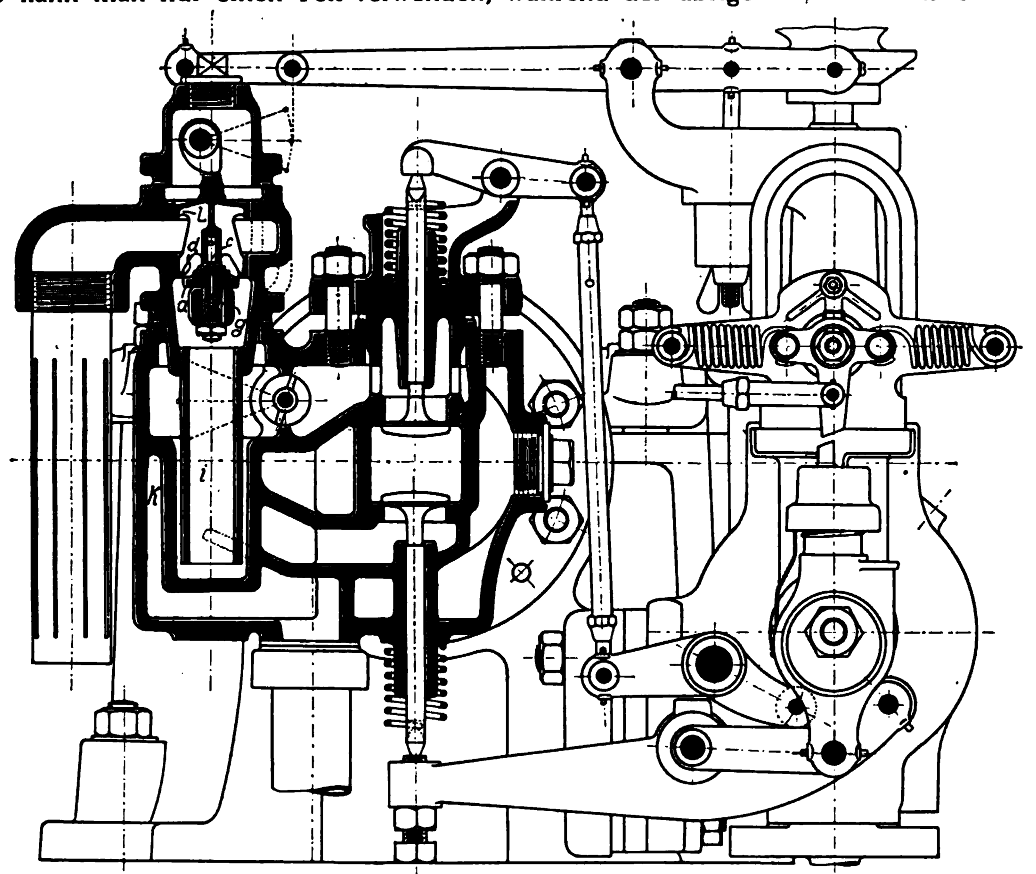


Abbildung 172. Vergaser und Steuerung von Körting.

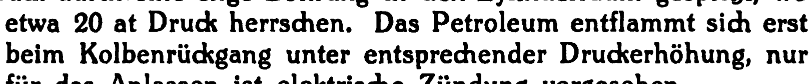
spiel für einen solchen Vergaser, deren es viele Konstruktionen gibt, diene Abbildung 172. Der Spiritus oder das Petroleum wird bei g über die Platte a geführt, die auch als Sitz für das oben mit dem Kolben l ausgestattete Ventil d dient. Der Raum über dem Kolben steht mit der Saugleitung der Maschine in Verbindung. Wenn diese saugt, hebt sich das Ventil d, nimmt durch einen Anschlag das Ventilchen c mit, so daß anfangs nur Luft, dann aber auch Brennstoff eintritt. Letzterer wird am Rande des Tellers a wieder den Schleier bilden, durch den die Luft hindurchtritt. Der Heizraum i wird durch einen Mantel k umgeben, durch den ein Teil der Abgase geführt wird. Damit sich das Petroleum nicht wieder von der Luft abscheidet, hat man auch die Heizung gleich am Vergaser angebracht und verstärkt, so daß sich Petroleumdämpfe bilden. Man darf dann natürlich wegen der Gefahr vorzeitiger Entzündung nur wenig Luft zuführen.

Die Zuführung des Brennstoffs ist verschieden. Meist wird derselbe in einem erhöht aufgestellten Gefäß untergebracht und fließt dem Vergaser einfach zu. Damit sich der Druck verhältnismäßig wenig ändert, setzt man das Gefäß auch durch Luftzuführung unter höheren Druck. Man verwendet aber auch Brennstoffpumpen, die in ein mit Überlauf versehenes Gefäß fördern, so daß dort das Niveau stets gleichbleibt, oder auch Pumpen, die unmittelbar in ihrer Fördermenge geregelt werden (vgl. Abbildung 175).

Die Zündung erfolgt bei flüssigen Brennstoffen meist elektrisch, nur wenn glühende Vergaser angewendet werden, ist überhaupt keine besondere Zündvorrichtung notwendig; man kann sie auch durch sehr hohe Verdichtung entbehrlich machen, da Petroleumgemisch leichter entzündlich ist als Gas. Dann ergeben sich aber bei kleinen Belastungen leicht Störungen. Die richtige Mischung von Brennstoff und Luft wird durch ein kleines Regelventil für den Brennstoff und eine Drosselklappe für die Luft erzielt.

Um die Verdichtung erhöhen zu können, hat Banki die Einspritzung von Wasser wieder erfolgreich eingeführt; Abbildung 157 zeigt eine solche Maschine. Die Luft tritt bei a ein und wird durch einen Schieber b entsprechend der erforderlichen Menge gedrosselt. Brennstoff und Wasser werden durch Düsen c und d zugeführt. Die Wassereinspritzung ist ziemlich bedeutend. k ist das offene Zündrohr.

Der Haselwandermotor (Abbildung 173) bildet den Übergang zu den Gleichdruckmotoren. Hier wird die Luft für sich allein verdichtet und der Brennstoff nachträglich eingespritzt. Dies erfolgt schon vor dem Kolbentotpunkt in der Verdichtungsperiode, und zwar dadurch, daß am Kolben ein in eine Bohrung des Verdichtungsraumes passender Ansatz d angebracht ist, der einen Ringraum abschließt, in dem eine bedeutend raschere Verdichtung erzeugt wird als im Verbrennungsraum selbst. Während der Saug- und Verdichtungsperiode wird nun mittels einer besonderen Brennstoffpumpe Petroleum in diese Vorkammer gebracht, und dieses wird endlich durch den erhöhten Druck durch eine enge Bohrung in den Zylinderraum gespritzt, wo



etwa 20 at Druck herrschen. Das Petroleum entflammt sich erst beim Kolbenrückgang unter entsprechender Druckerhöhung, nur für das Anlassen ist elektrische Zündung vorgesehen.

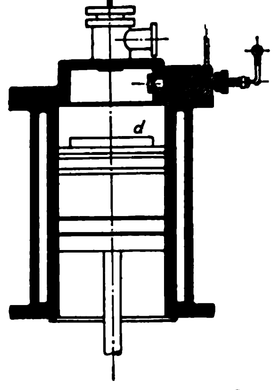


Abbildung 173. Zylinder zum Haselwandermotor.

Die höchste Stufe der Entwicklung des Verbrennungsmotors ist durch die Erfindung Diesels gekennzeichnet. Beim Diesel-Motor ist die getrennte Verdichtung von Luft und Brennstoff in noch weit erhöhtem Maße, bis auf etwa 35 at, angewendet und mit dem Gleichdruckverfahren verbunden (Abbildung 174). Die Temperatur bei dieser hohen Kompression ist so hoch, daß das nach dem Totpunkt eingespritzte Petroleum außerordentlich vollkommen verbrennt, wodurch die sonst sehr fühlbaren Übelstände der Petroleummotore ganz beseitigt werden. Dabei können auch beliebig arme Gemische verwendet werden, so daß die Verminderung der Brennstoffzufuhr unmittelbar als Regelungsmittel ohne bedeutende Abnahme des Nutzeffekts verwendet werden kann. Das Gestell bildet gleichzeitig den Wassermantel für den Zylinder. Die Ventile liegen im Deckel, der den Abschluß des hier sehr kleinen Verdichtungsraums bildet, so daß nur wenig Abgase im Zylinder verbleiben. E ist das Eintritts-, A das Auslaßventil, dazwischen liegt das Zerstäubungsventil Z, das ebenfalls gesteuert wird. Die Verbrennung erfolgt gleichzeitig mit dem Ausweichen

des Kolbens, so daß kein wesentliches Ansteigen des Verbrennungsdruckes über den Verdichtungsdruck zu bemerken ist (vgl. Abbildung 150). Die Zerstäubung selbst ge-

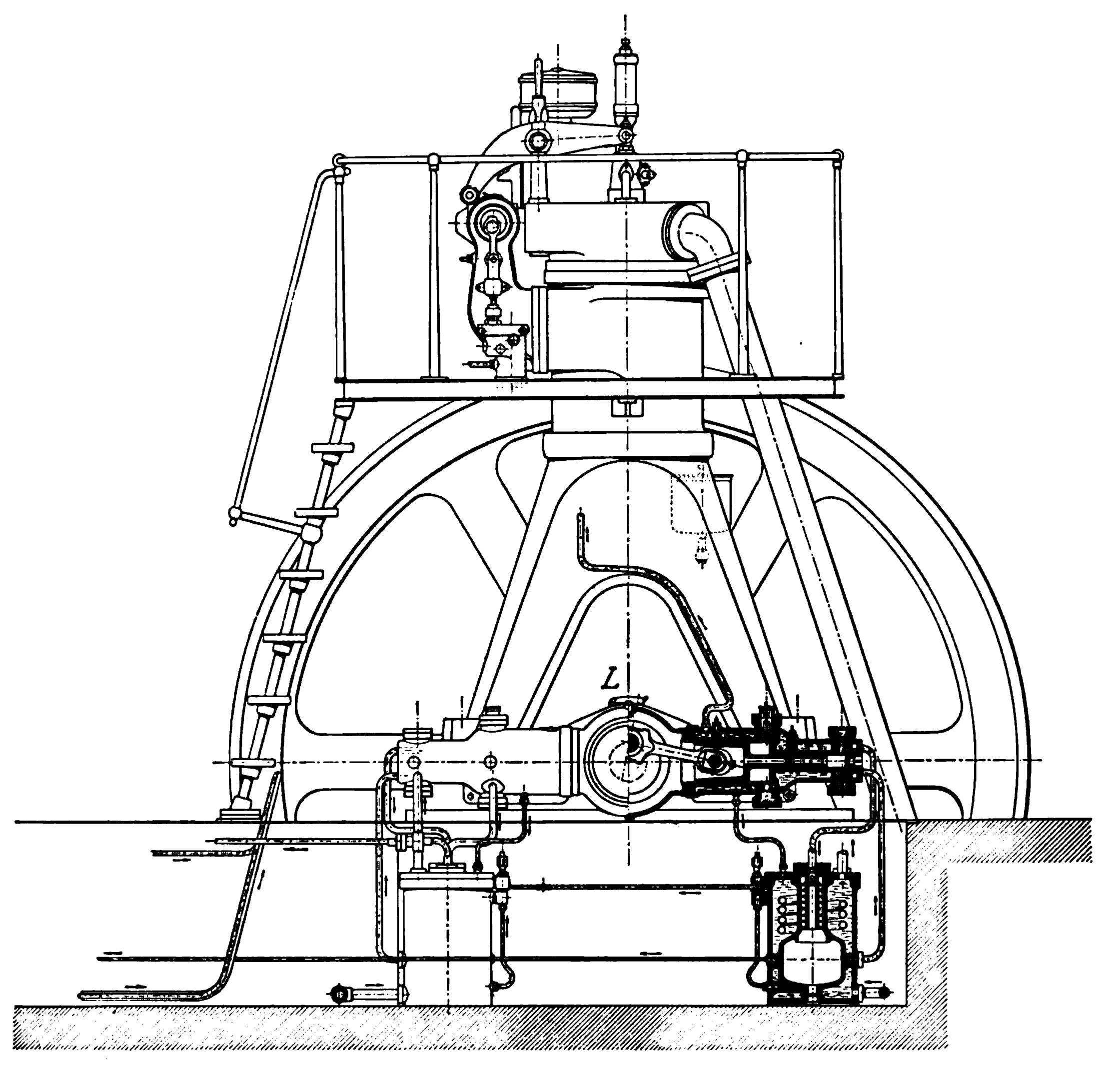
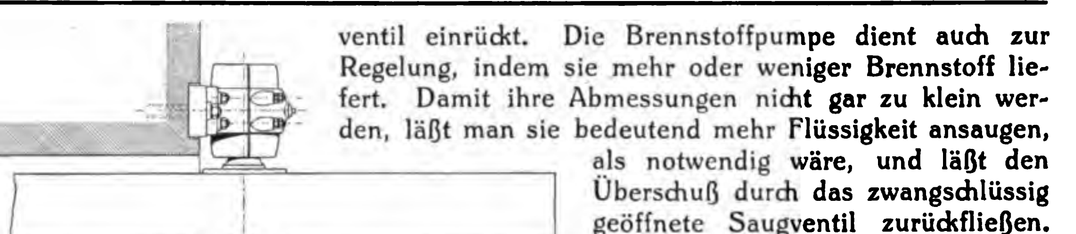


Abbildung 174a. Dieselmotor, ausgeführt von der Deutzer Maschinenfabrik.

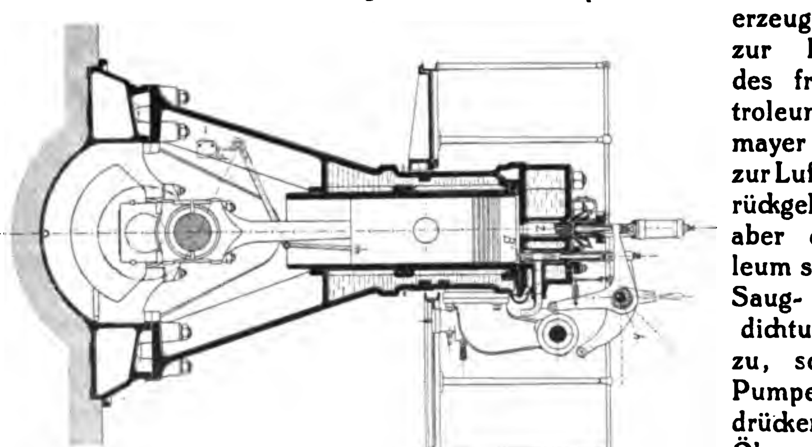
schieht so, daß besondere Luftpumpen L Druckluft von 50 bis 60 at erzeugen, während eine regelbare Ölpumpe (Abbildung 175) den Brennstoff in einen um das Ventil liegenden Ringraum drückt. Öffnet man dieses, so reißt die in den Zylinder einströmende Druckluft den Brennstoff mit, indem sie es in einer Reihe von gelochten Stahlplatten fein zerstäubt. Abbildung 176 zeigt bei a die Zuführung von Druckluft, bei b jene des Petroleums zum Ventil Z, bei c die Zerstäuberplatten. Das Anlassen der Maschine erfolgt mittels aufgespeicherter Druckluft durch ein besonderes Anlaßventil B (Abbildung 174), das zeitweilig mit dem Auslaßventil zusammen arbeitet. Die Einrückung der Anlaßsteuerung wird durch Verdrehen der auf der festen Achse sitzenden Hohlwelle h bewirkt, die entweder den Anlaßhebel oder den Hebel für das Eintritts-



ventil einrückt. Die Brennstoffpumpe dient auch zur Regelung, indem sie mehr oder weniger Brennstoff liefert. Damit ihre Abmessungen nicht gar zu klein werden, läßt man sie bedeutend mehr Flüssigkeit ansaugen, als notwendig wäre, und läßt den Überschuß durch das zwangschlüssig geöffnete Saugventil zurückfließen. Die Dauer dieser Öffnung während der Druckperiode wird nun vom Regler dadurch bewirkt, daß der Pumpenplunger P (Abbildung 175) eine Stange S mitbewegt, die das Saugventil zeitweilig anhebt. Der dazu dienende Hebel H hat einen vom Regler verstellbaren Drehpunkt, so daß die Lage der Stange S höher oder tiefer ist und daher das Saugventil verschieden lang geöffnet wird.

Abbildung 174b.

Um die zweistufige Luftpumpe zu vermeiden, haben Diesel und Trinkler auch die im Zylinder vorgepreßte Luft verwendet, letzterer durch einen besonderen im Zylinderdeckel angebrachten Luftkolben mit passiver Steuerung. Brons benutzt den durch Explosion in einer Vorkammer erzeugten Druck zur Einspritzung des frischen Petroleums. Lietzenmayer ist wieder zur Luftpumpe zurückgekehrt, führt aber das Petroleum schon in der Saug- und Verdichtungsperiode zu, so daß die Pumpe nicht hochdrücken muß. Das Öl sammelt sich in einer nach innen offenen Düse und wird von der durch ein gesteuertes Luftventil zuströmenden Luft zerstäubt und in den Zylinderraum mitgerissen (Abbildung 177).



Dieselmotor, ausgeführt von der Deutzer Maschinenfabrik.

Auch Gleichdruckmotoren sind in neuester Zeit doppeltwirkend ausgeführt worden (Abbildung 178).

Als Beispiele von Zweitaktmaschinen seien die Oechelhäuser-Maschine (Abbild. 179) und die Bauart der Siegener Maschinenfabrik (Abbildung 152 u. 180) angeführt. Der Arbeitszylinder der ersteren enthält zwei gegeneinanderbewegte Plungerkolben, zwischen denen bei größter Annäherung der Verdichtungsraum liegt und die Zündung stattfindet. Der Eintritt von Gas und Luft erfolgt bei äußerster Stellung der Plunger durch die am Anfang des Zylinders befindlichen Öffnungen c und d, der Austritt der Abgase am entgegengesetzten Ende bei e; alle diese Schlitzöffnungen werden von den Plungerkolben gesteuert. Zuerst werden die Auspuffschlitze freigegeben, dann die Luftschlitze zum Zweck der Ausspülung der Abgase und endlich auch die Gasöffnungen. Der Abschluß erfolgt in umgekehrter Reihenfolge. Die Übertragung der Kolbenkräfte auf die dreifach gekröpfte Kurbelwelle ist aus der Abbildung 179 zu ersehen, der hintenliegende Kolben treibt durch zwei den Zylinder umgreifende Stangen auf die Kurbeln; außerdem ist er unmittelbar mit den Ladepumpen f und g, die in einem Zylinder untergebracht sind, gekuppelt. Diese Luft- und Gaspumpen fördern in die die Schlitze c und d umgebenden Ringhohlräume. Aus den Druckräumen dieser Pumpen führen Umlaufleitungen mit eingebauten Abschlüssen zu den Saugrohren zurück, durch Einwirkung des Reglers auf diese Abschlußorgane kann demnach die Luft- und Gasmenge verändert werden. Der Regler beeinflußt manchmal zur richtigen Ausgleichung der Drücke außerdem einen die Gasschlitze umschließenden Ringschieber, während jener für die Luftschlitze nur von Hand verstellbar eingerichtet ist. Einfacher ist die von den Firmen Körting, Klein in Dahlbruch und der Siegener Maschinenfabrik u. a. angewendete Schieberregelung für die Luft- und Gaspumpe, die der Rider-Steuerung

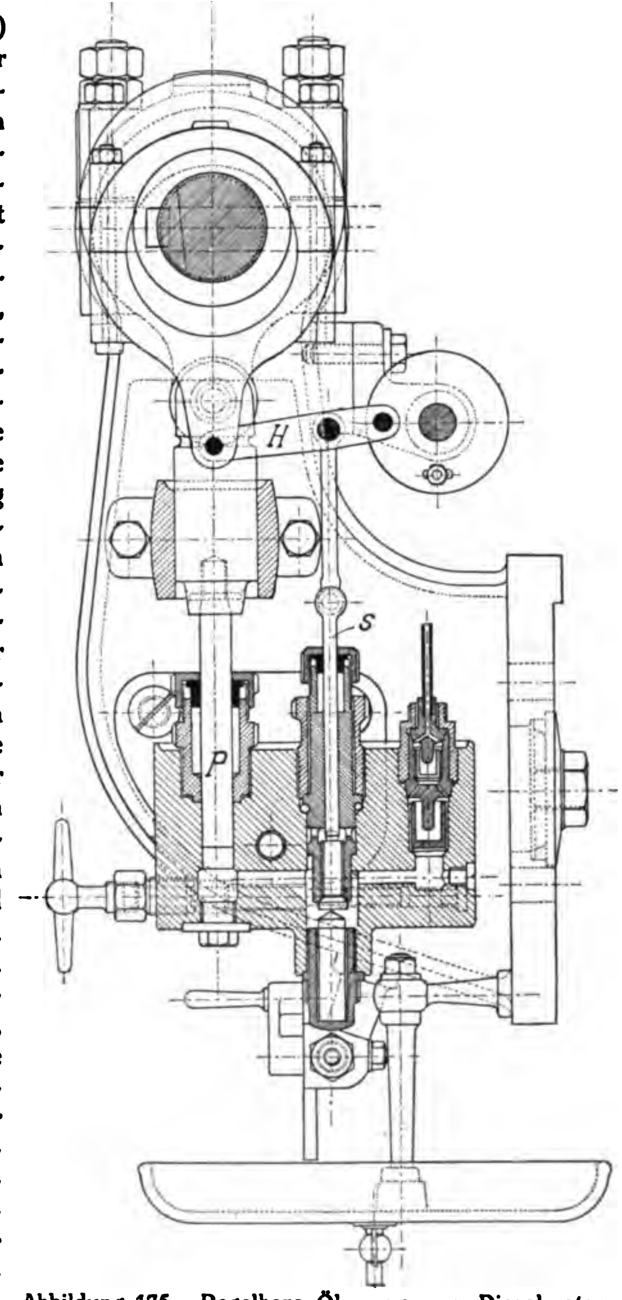


Abbildung 175. Regelbare Ölpumpe zum Dieselmotor.

der Dampfmaschinen ähnlich ist, indem durch Verdrehung der Steuerschieber die Veränderung der Fördermenge erzielt wird. Bei der Ausführung der Siegener Maschinenfabrik (Abbildung 152 u. 180) wird bei kleinen Leistungen auch die Luftmenge verkleinert; die Verdichtung findet nur so lange statt, als der Saugschieber geschlossen ist; wenn derselbe öffnet, findet Rückströmung in die Saugleitung statt. Der Gasschieber öffnet hier ein zweites Mal einen Rücklauf, wodurch Gas aus dem Druckraum zurückgesaugt und in der Nähe des Einlaßventils durch Luft ersetzt wird, so daß beim Spülen zuerst nur Luft eintreten kann.

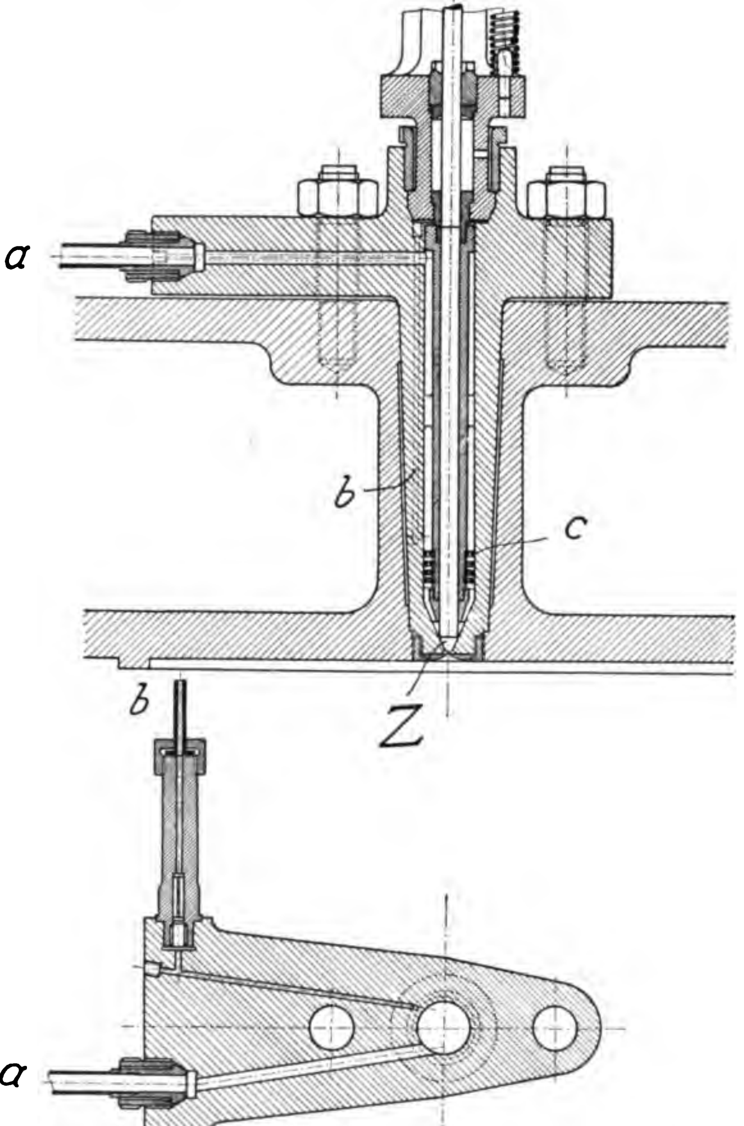


Abbildung 176. Einspritzdüse zum Dieselmotor.

Für die vorteilhafte Verwendung von Gicht- und Koksofengas ist die Reinigung der Gase von Staub von außerordentlicher Wichtigkeit, da nur bei entsprechender Reinheit der ungestörte Betrieb möglich ist. Die Grobreinigung erfolgt zuerst in erweiterten Kammern unter Verkleinerung der Geschwindigkeit und Richtungsänderung des Gasstroms, so daß sich dort die gröberen Staubteile absondern. Diesen Kammern folgen meist Naßreiniger, in denen Gas mit eingespritztem Wasser in innige Berührung kommt und abgekühlt wird, während das abfließende Wasser den größten Teil des Staubes als Schlamm mitführt. Die Verteilung des Wassers geschieht entweder durch Brausen in einfachen stehenden zylindrischen Gefäßen oder in sogenannten Hordenwäschern, in denen das Gas von unten her dem durch Holzleisten verteilten und herabrieselnden Wasser entgegengeführt wird. Diesen Naßreinigern folgt manchmal auch noch ein besonderer Kühler, in dem das Gas ebenfalls einen feinen Regen von Wasser durchströmt.

Als Feinreiniger dienen manchmal nur trockene Koksfilter, meist aber Schleudergebläse mit eingespritztem Wasser, das sich dann in besonderen Wasserabscheidern

wieder absondert (Zschokke). Vielfach werden auch sogenannte Zentrifugalwäscher (Theisen) verwendet. Eine etwas kegelförmige Trommel ist außen mit schraubenförmigen und am Ende mit radialen Flügeln versehen, so daß sie bei der Drehung als Ventilator arbeitet und das Gas zuerst in achsialer, dann in radialer Richtung nach außen hin preßt. Das Gas tritt an einem Ende der Trommel zwischen diese und das Gehäuse, dessen Innenwand mit einem Siebblech belegt ist. Dem Gehäuse wird von außen her Wasser zugeführt, das infolge der Kegelform desselben dem Gasstrom entgegenbewegt wird. Man kann so das Gas bis auf weniger als 0,02 g-cbm Staubinhalt bringen.

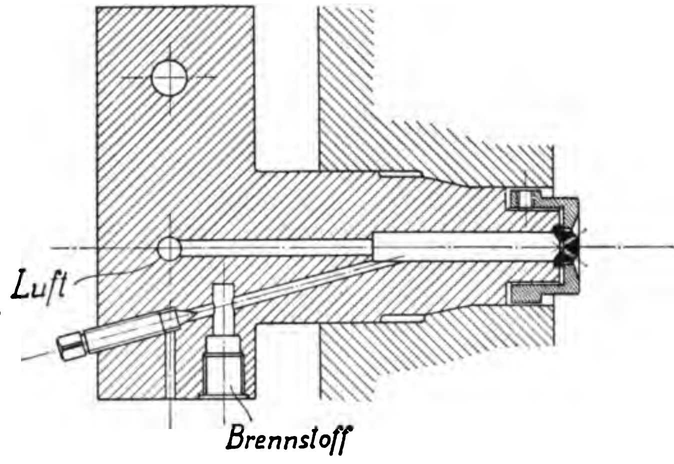


Abbildung 177. Einspritzdüse zum Lietzenmayermotor.

Bei der Erzeugung von Koksofengas durchläuft dieses zuerst die Teerabscheider, denen nur mehr eine Feinreinigung zu folgen braucht, meist in Form eines Kugelwäschers von Zschokke und eines Rasenreinigers. Ersterer besteht aus einer teilweise unter Wasser stehenden Siebtrommel, die achsial und radial in Abteilungen geteilt ist, in denen sich Holzkugeln befinden. Bei der langsamen Drehung der Trommel bewegen sich die Kugeln gegeneinander und reiben sich gegenseitig ab, so daß das Gas immer mit neuen, reinen Flächen in Berührung kommt und dort den Staub zurückläßt. Die Rasenreiniger bestehen aus einer Anzahl von Rosten, auf denen Koks und Rasenerz gelagert ist, durch das das Gas von unten her hindurchgeführt wird; für entsprechende Auswechselung der Filtermasse muß gesorgt werden.

Endlich sollen noch an je einem Beispiel eine Druck- und eine Sauggaserzeugungs-Anlage (Abbildung 181 u. 182) beschrieben werden. Der Dampfkessel A erzeugt überhitzten Dampf, der mittels Dampfstrahlgebläse a Luft ansaugt und das Dampf- und Luftgemisch unter den Rost des Generators B drückt. Das im Generator sich bildende Gas geht dann durch das Gefäß C, wo sich etwas Teer im Wasser abscheidet und das als Wasserverschluß gegen Rücktritt von Gas in den Erzeuger dient. Von

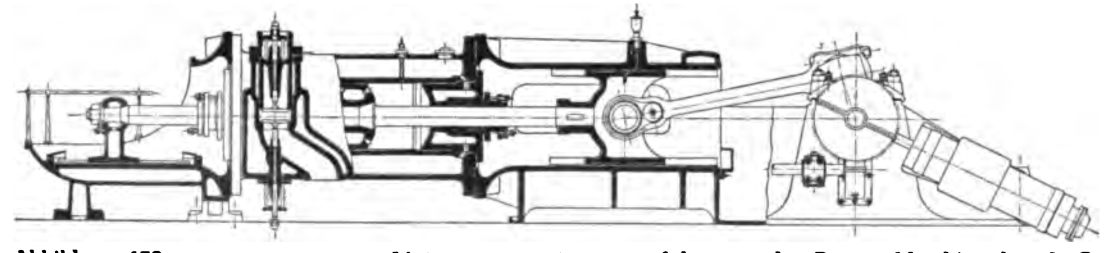
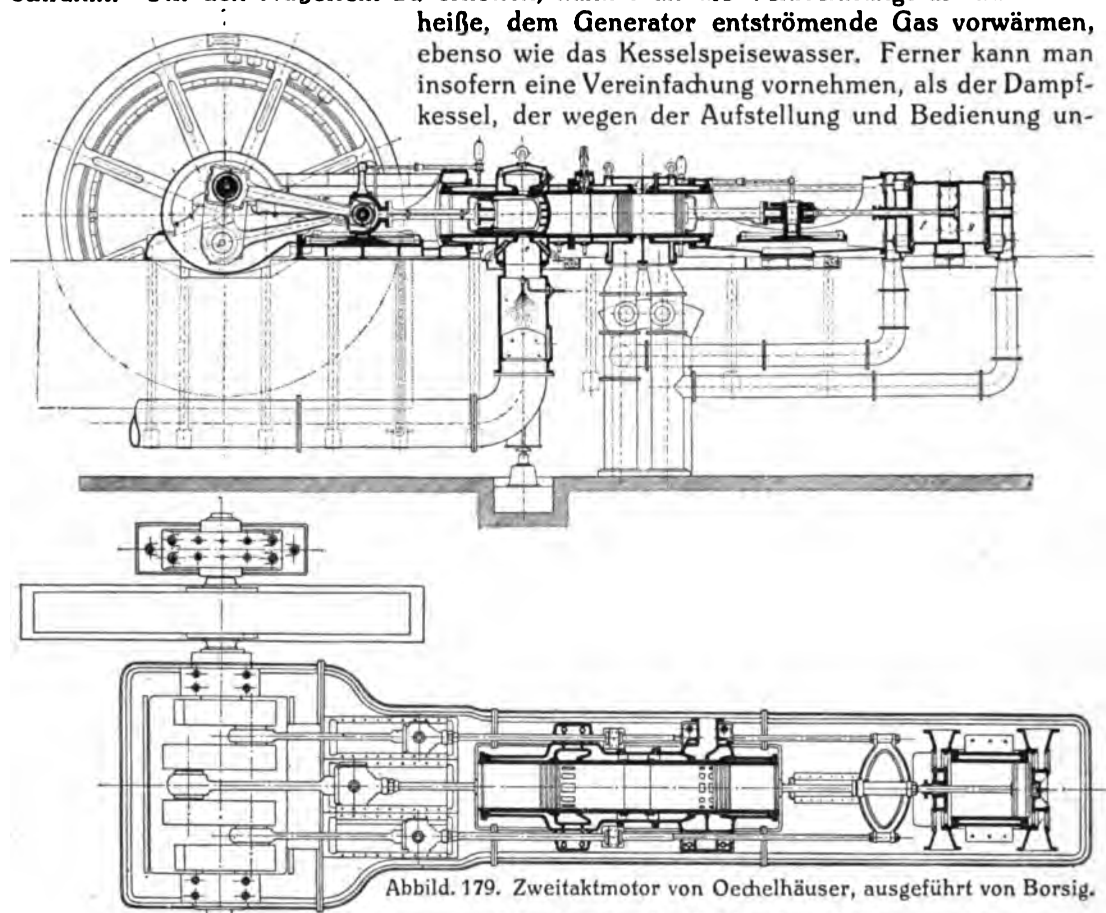


Abbildung 178. Lietzenmayermotor, ausgeführt von der Prager Maschinenbau-A.-G.

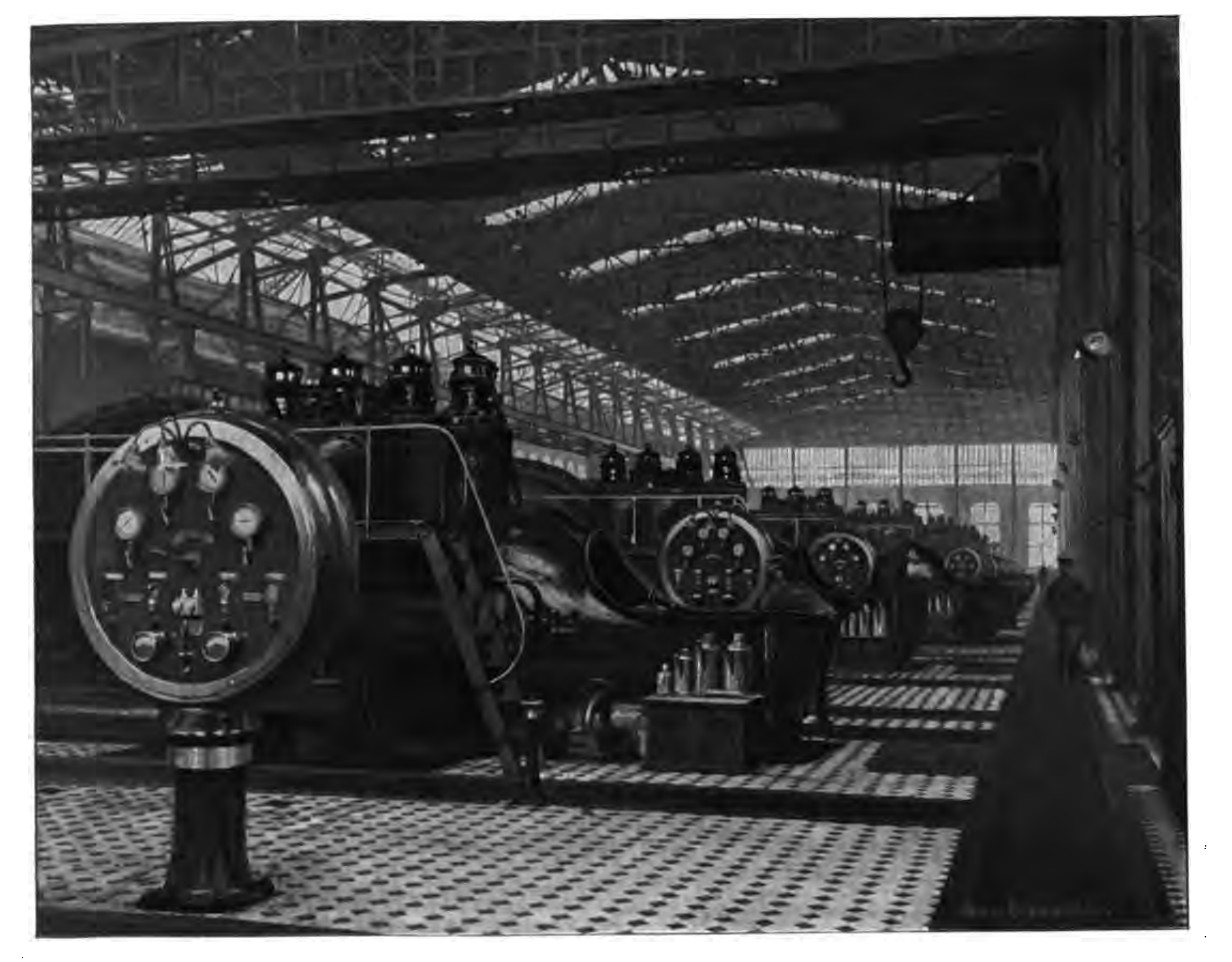
hier tritt das Gas von unten her in den Scrubber D, in dem auf dem Rost Koksstücke aufgehäuft sind, während von oben her Wasser über dieselben rieselt. Dadurch wird das Gas gereinigt und gekühlt, und es wird sodann manchmal noch durch

den Sägespäne-Reiniger E zu einer Gasglocke geführt. Dieser Gasbehälter ist hier notwendig, weil die Menge des entstehenden Gases vom Verbrauch unabhängig ist, wenn nicht Dampf- und Luftzutritt gehemmt werden; dies besorgt nun die Gasglocke, wenn sie über eine gewisse Höhe ansteigt. Zur Beschickung des Generators dient der Trichter b mit Doppelverschluß, der den Zutritt von Luft von außen her beschränkt. Um den Nutzeffekt zu erhöhen, kann man die Verbrennungsluft durch das heiße, dem Generator entströmende Gas vorwärmen, ebenso wie das Kesselspeisewasser. Ferner kann man insofern eine Vereinfachung vornehmen, als der Dampfkessel, der wegen der Aufstellung und Bedienung un-



Abbild. 179. Zweitaktmotor von Oechelhäuser, ausgeführt von Borsig.

bequem ist, durch ein Schleudergebläse ersetzt werden kann, wenn man in den Aschenraum des Generators vorgewärmtes Wasser leitet und dieses durch die strahlende Wärme von oben her verdampft. Trotz dieser Verbesserungen haben die Sauggasanlagen mehr Verbreitung gefunden, bei denen auch noch der Ventilator und der Gasbehälter wegfallen, letzterer, weil die Regelung der Gasmenge von der Maschine selbst erfolgt. Bei Sauggas ist auch das Austreten von Gas unmöglich, da Undichtheiten nur die Luft im Generator vermehren, was an der Maschine bald bemerkt werden muß, bevor das Gasgemisch etwa explosibel wird. Abbildung 182 zeigt eine solche Sauggasanlage. Sie besteht aus dem Generator B mit dem Rost a und dem Beschickungsraum c. Das Gas durchströmt die Rohre des Verdampfers D, dem durch das Überlaufgefäß e Wasser zugeführt wird, so daß dessen Niveau stets gleich hoch ist, dann wird es durch das unter Wasserabschluß stehende Rohr f dem Scrubber I zugeführt, in dem der Wasserspiegel durch



Großgasmaschinenhalle.

Zu Körner: Überblick über die heutigen Wärmekraftmaschinen.

den Überlauf k festgehalten wird. Die Maschine saugt nun beim Betrieb Luft und Dampf durch den Apparat an, wobei der Gastopf l nur die Druckausgleichung her-

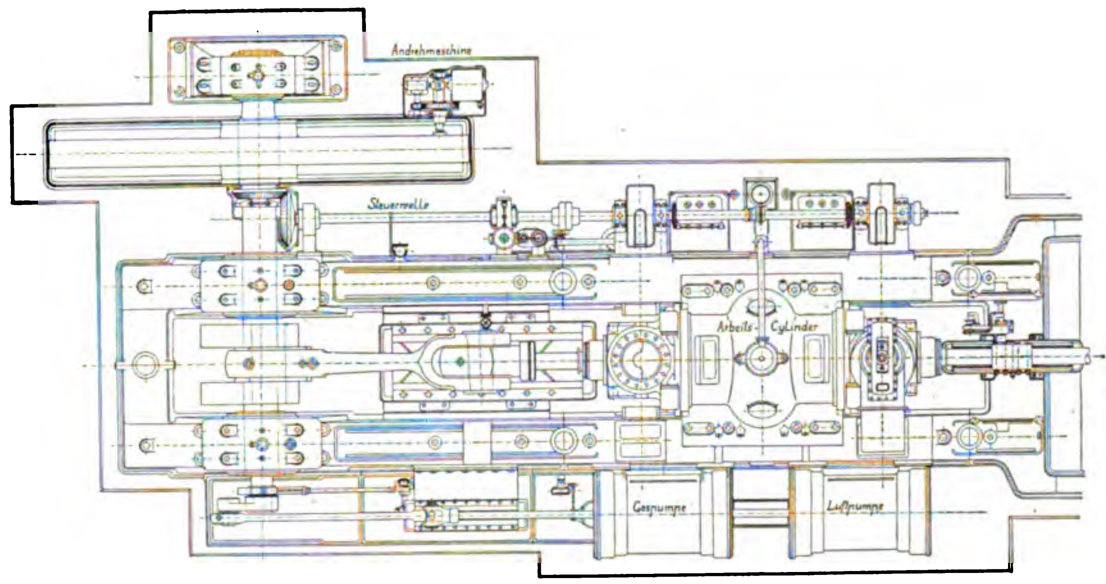


Abbildung 180. Zweitaktmotor der Siegener Maschinenfabrik.

zustellen hat. Beim Anlassen wird der Hahn g geöffnet und mittels eines Ventilators Luft in den Raum a geblasen. Neben dem Scrubber wird manchmal noch ein Stoßreiniger verwendet, d. i. ein Gefäß, in dem eine Anzahl von Blechen quer zum Gasstrom liegen, wodurch Unreinigkeiten ausgeschieden werden. Statt der Holzlatten im Scrubber verwendet man auch Koks, manchmal kommen auch noch Sägespäne-Reiniger zur Verwendung. Die gleichmäßige Zusammensetzung des Gases bei verschiedener Belastung, also verschiedener Luftmenge, ist von der Wahl der Abmessungen abhängig und erfordert eine gewisse Erfahrung, jedenfalls muß man mit Rücksicht hierauf vorsichtshalber die Maschine etwas reichlicher wählen. Zur Ausgleichung der Saugwirkung wird manchmal ein Druckregler eingebaut, d. i. eine Gasglocke, die bei größerem Bedarf sinkt, bei kleinerem infolge der Einwirkung einer Feder sich hebt.

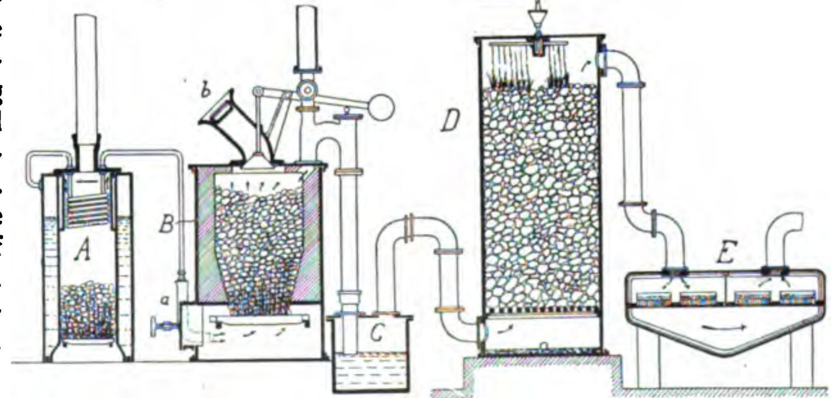


Abbildung 181. Druckgasanlage der Deutzer Maschinenfabrik.

Für diese Generatoren kommen als Brennstoff Anthrazit und Koks in Betracht, während teerbildende und backende Kohlen nicht verwendet werden können; der sich bildende Teer ist schwer abzuscheiden und bildet in der Maschine harte Krusten. Es muß daher bei Verwendung von Kohle

die Teerbildung vermieden werden. Beim Mondgas wird dies dadurch erreicht, daß die Vergasung durch Einführung von großen Dampfmengen bei sehr niedriger Temperatur vor sich geht. Da das Verfahren aber sehr verwickelt ist, kann es vorteilhaft nur bei großen Anlagen verwendet werden. Man hat nun auch versucht, magere Kohlen zuerst in Koks zu verwandeln und dann zu vergasen, die zuerst entstehenden schweren Kohlenwasserstoffe aber in gutes Gas überzuführen. Dazu hat man die Öfen geteilt, die Gase in der Mitte abgesaugt und im oberen Teil nun die teerbildenden Gase ausgetrieben und über oder unter den Rost geführt, während die eigentliche Vergasung nur im unteren Teil erfolgt.

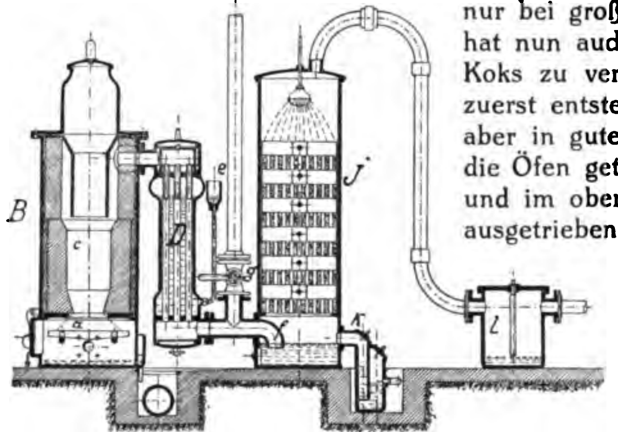


Abbildung 182. Sauggasanlage von Körting.

Die Berechnung der Zylinderabmessungen setzt wie bei Dampfmaschinen die Annahme eines mittleren indizierten Druckes voraus, sowie eines erreichbaren mechanischen Wirkungsgrades, der für Viertaktmaschinen zwischen 80 bis 85 v. H., bei Zweitaktmaschinen zwischen 75 und 80 v. H. schwankt. Die Mittelspannung kann für Leuchtgas mit 5,5, für Kraftgas, Gichtgas mit 4,5, für Koksofengas, Benzin und Spiritus mit 5 und für Petroleum-Diesel-Maschinen mit 7 kg-qcm angenommen werden.

SCHLUSZWORT. Damit ist in gedrängter Kürze ein Überblick über die Formen und die Betriebsweise unserer heutigen Wärmekraftmaschinen gegeben, dem an einigen Stellen auch Andeutungen über konstruktive Einzelheiten hinzugefügt sind. Es könnten noch die Wärme-Arbeitsmaschinen besprochen werden, wie Kompressoren oder Kühlmaschinen, die gewiß manches Interessante bieten, aber einen zu großen Raum beanspruchen würden.

Die Wärmemaschinen beherrschen seit Erfindung der Dampfmaschine das Feld des Kraftmaschinenbaues, und erst die Verbreitung der elektrischen Kraftübertragung hat das Interesse wieder auf die durchgreifende Ausnutzung der Wasserkräfte gelenkt, die im nächsten Abschnitt besprochen werden soll. Man kann sich leicht eine Vorstellung von dem Einfluß bilden, den jeder wesentliche Fortschritt auf dem Gebiete des Kraftmaschinenbaues überhaupt nicht nur auf den Maschinenbau, sondern auch auf die ganze Kultur nehmen muß. Es erscheint daher selbstverständlich, daß jeder Gebildete sich nicht nur oberflächlich über das Wesen der Dampf- oder Verbrennungsmaschine im klaren sein, sondern daß er auch ein etwas eingehenderes Verständnis für dieselben aufbringen sollte. Es ist nur eine Dankesschuld gegen diese Maschinen, die die in den Brennstoffen schlummernden Kräfte der Menschheit dienstbar gemacht und diese zum größten Teil von der Sklaverei einseitiger Körperarbeit befreit haben, und die wir als Mitbegründer und Erhalter unserer heutigen Lebensführung ansehen müssen, wenn man ihnen so viel Interesse entgegenbringt, daß man wenigstens ihre Haupteigenschaften zu erkennen und ihre Wirkungsweise zu verstehen sucht. Das ist gewiß auch für den Laien leicht zu erreichen, wenn er sich durch die Fülle von Einzelheiten, die beim Anblick einer Maschine das Wesentliche zu verdecken scheinen, nicht sogleich abschrecken läßt. Wenn daher der in diesem Sinne beabsichtigte Abschnitt zu einer wünschenswerten Besserung beiträgt, ist sein Zweck erreicht.

WASSERKRAFT UND WINDKRAFT

VON JOS. SCHEUER

1. TECHNISCHE GRUNDLAGEN DER WASSERKRAFTAUSNUTZUNG

WIRKUNGSWEISE DER WASSERKRAFTMASCHINEN. Der Ausbau natürlicher Wasserkräfte ist im Prinzip, weniger allerdings in der tatsächlichen Ausführung, sehr einfach. Einige Bilder werden später die Hauptteile eines solchen Ausbaues zeigen. Das Wasser wird durch Kanäle oder Rohrleitungen der Wasserkraftmaschine zugeführt. Die im Wasser zugeführte Energie ist zu messen durch das Produkt Wassermenge × Gefälle. Das Gefälle ergibt sich durch den Höhenunterschied von Oberwasserspiegel bis Unterwasserspiegel. Durch die Wasserkraftmaschine soll nun dem zugeführten Wasser die Energie entzogen werden, das Wasser soll die Maschinenwelle in Umdrehung versetzen. Wie dann aus der Maschinenwelle die Energie entnommen und nutzbar verwertet wird, ist hier nicht zu besprechen.

In der modernen Technik verlangt man fast ausnahmslos hohe Drehzahlen und große Leistungen bei geringem Raumbedarf. Dadurch wurde das Anwendungsgebiet der bekanntesten und ältesten Wasserkraftmaschine, des Wasserrades, bis zur Bedeutungslosigkeit beschränkt.

Aus den gleichen Gründen kommen auch die Wasserkraft-Kolbenmaschinen (Wassersäulenmaschinen, Wassermotoren) nicht mehr in Betracht, obwohl sie manche sinnreiche, praktisch bewährte Konstruktion aufzuweisen hatten.

Heute beherrschen die Turbinen, und zwar Francisturbine und Peltonrad, das Gebiet technischer Wasserkraftausnutzung. Noch vor einem Jahrzehnt wurden die verschiedensten Turbinenarten gebaut: Jonval-, Fourneyron-, Girard-, Schwamkrug-, Knop-Turbinen. Die Auslese vollzog der praktische Betrieb und wirtschaftliche Wettkampf durch die Forderungen: hohe Drehzahl, hoher Wirkungsgrad bei verschiedener Wassermenge, Betriebssicherheit, kleiner Raumbedarf, geringe Anschaffungskosten.

Francisturbine und Peltonrad haben den Namen nach Amerikanern, die diese Maschinen zwar nicht im Prinzip erfunden, doch in der Bauart verbessert haben.

In Abbildung 1 ist eine Francisturbine, in Abbildung 2 ein Peltonrad schematisch dargestellt. Es bedeutet a die stillstehende Vorrichtung zur geregelten Wasserzuführung, bei der Francisturbine Leitapparat, beim Peltonrad Düse genannt. Mit b ist das Laufrad bezeichnet, an welches das Wasser seine Energie abgibt, indem es das Laufrad und dadurch die Welle o in Drehung versetzt. Von der Welle o kann dann irgendwie die Energie abgenommen werden.

Der grundsätzliche, tief einschneidende Unterschied zwischen beiden Maschinen liegt nun darin, daß die Francisturbine eine Überdruckturbine, das Peltonrad eine Gleichdruckturbine ist. Um die Bedeutung dieses Unterschiedes in jeder Hinsicht ganz klarstellen zu können, wäre es nötig, die Grundsätze der Turbinentheorie und Turbinenberechnung hier zu entwickeln. Zur Gewinnung eindringender Kenntnisse

in dieser Hinsicht muß auf die Fachliteratur hingewiesen werden.* Einen oberflächlichen Einblick möge das Folgende bieten. In der Gleichdruckturbine (auch Freistrahlturbine genannt) besitzt der Wasserstrahl beim Austritt aus der Düse a eine Geschwindigkeit, die dem ganzen über a lastenden Gefälle entspricht. Die ganze durch das Gefälle dargestellte potentielle Energie (Energie der Lage) des Wassers ist umgewandelt in kinetische Energie, ist nur mehr als Geschwindigkeit vorhanden. Der Wasserstrahl trifft das Laufrad b, dessen becherartige Schaufeln in Abbildung 2 schematisch dargestellt sind (s. auch Abbildung 31 u. 32). Die Schneide der symmetrischen Schaufel teilt den Strahl, der nach beiden Seiten abfließt. Falls der Strahl die Geschwindigkeit c in Richtung des Radumfanges hat, die Schaufel eine Umfangsgeschwindigkeit $u = \frac{c}{2}$ besitzt, so würde das Wasser in der Schaufel mit einer Geschwindigkeit $w = c - u = c - \frac{c}{2} = \frac{c}{2}$ entlang fließen (s. Abbildung 3). Beim Austritt aus der Schaufel setzt sich nun die Geschwindigkeit, die das Wasser relativ gegen die Schaufel hat, also $w = \frac{c}{2}$, mit der gleichzeitig mit der Schaufel innegehaltenen Umfangsgeschwindigkeit $u = \frac{c}{2}$ nach Abbildung 3 zusammen zu einer Geschwindigkeit $c = \frac{c}{2} - \frac{c}{2} = o$, d. h. dem Strahl wäre also innerhalb der Schaufel seine ganze Geschwindigkeit, d. h. in diesem Falle seine ganze Energie entzogen worden, die er an das Laufrad abgegeben hat. Nach dieser Betrachtung wäre also für das Laufrad eine Umfangsgeschwindigkeit gleich der halben Strahlgeschwindigkeit am günstigsten, weil dabei dem Strahl seine ganze kinetische Energie entzogen würde. Doch ist hierbei nicht berücksichtigt

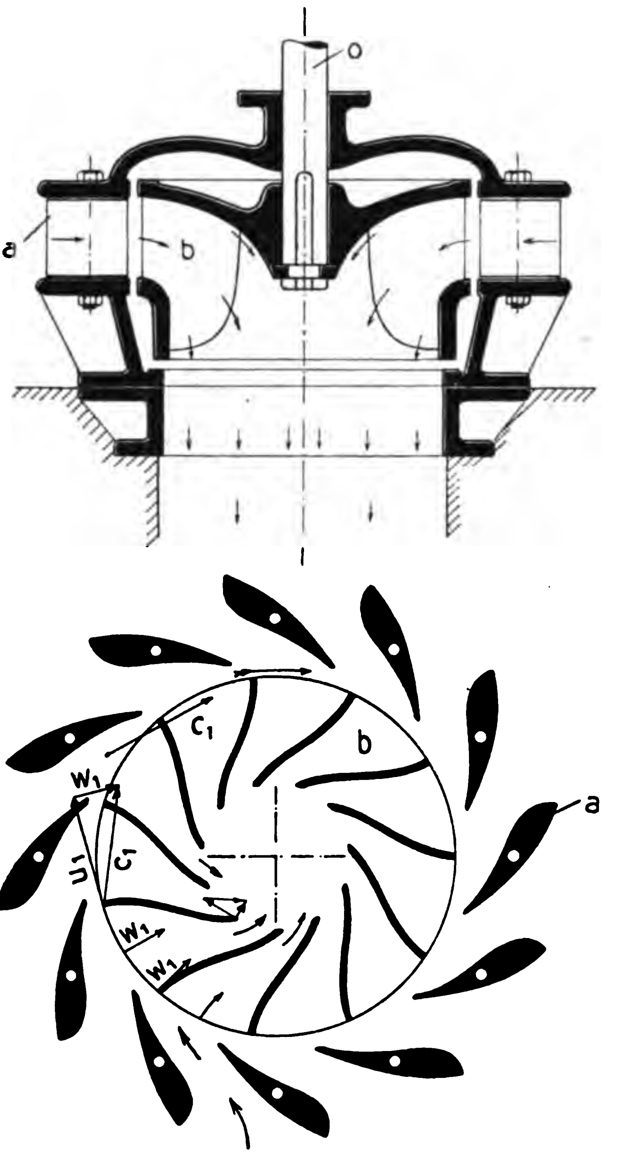


Abbildung 1.

* Escher: „Theorie der Wasserturbinen", M. 8. Pfarr: „Turbinen für Wasserkraftbetrieb", M. 36. Thomann: „Wasserturbinen", M. 25.

worden, daß innerhalb der Schaufel der Strahl durch Reibung gebremst wird, also relativ gegen die Schaufel nicht mit der gleichen Geschwindigkeit abfließen kann, mit der der Eintritt erfolgte, sondern die relative Austrittsgeschwindigkeit geringer ist. Ferner darf die gesamte (absolute) Austrittsgeschwindigkeit nicht gleich Null sein, weil dann das aus einer Schaufel abfließende Wasser sich anstauen würde. Deswegen hat der Schaufelbecher am Austrittsende auch noch eine leichte Neigung nach außen (s. Abbild. 31 u. 32). Weil zu leicht eine Beschädigung möglich wäre, kann auch die strahlteilende Eintrittskante nicht ganz messerscharf ausgeführt werden, sondern muß einen kleinen Eintrittswinkel erhalten. Endlich besitzt auch bereits der Strahl am Düsenende nicht die volle Geschwindigkeit, die dem ganzen vor der Düse verfügbaren Gefälle entspricht, sondern eine kleinere wegen der unvermeidlichen Reibungswiderstände in der Düse. Das alles zusammen bewirkt, daß für die günstigste Wirkung das Laufrad nicht mit einer Umfangsgeschwindigkeit $u = \frac{c}{2}$ umlaufen darf, wenn c die dem Gefälle H vor der Düse entsprechende Geschwindigkeit $c = \sqrt{2gH}$ darstellt, sondern einen kleineren Wert, etwa $u = 0{,}44 \times c$ bis $u = 0{,}47 \times c$. Wegen der erwähnten Verluste kann natürlich auch nicht die dem ganzen Gefälle entsprechende Energie im Laufrad gewonnen werden. Der Wirkungsgrad, das ist das Verhältnis der an die Maschinenwelle abgegebenen Energie zur im Wasser zugeführten, ist kleiner als 1, bei größeren Ausführungen etwa 0,83 bis 0,87.

Abbildung 2.

Nun zur Francisturbine. Die Francisturbine ist eine Überdruckturbine, d. h. hinter ihrem Leitapparat a (Abbildung 1) herrscht nicht der gleiche Druck wie hinter dem Laufrad b (beim Peltonrad hinter der Düse a und im Laufrad b gewöhnlicher atmosphärischer Luftdruck), sondern es ist ein Druckunterschied, bei a ein Überdruck gegen den Laufradaustritt vorhanden. Beim Austritt aus dem Leitapparat a besitzt das Wasser eine Geschwindigkeit, die nur einem Teil des verfügbaren Gefälles entspricht, nur ein Teil der potentiellen Energie ist in kinetische Energie umgewandelt. Damit ein Überdruck herrschen kann, muß der Leitapparat das Laufrad auf den ganzen Umfang umschließen; eine teilweise Beaufschlagung, wie beim Peltonrad durch eine oder mehrere Düsen vorgenommen, ist nicht möglich. Die Betrachtungen über günstigste Umfangsgeschwindigkeit des Francislaufrades lassen sich nicht so einfach wie beim Peltonrad anstellen und sollen deswegen hier unterbleiben. Das gleiche trifft zu für die Reibungsverluste, Ein- und Austrittsgeschwindigkeit und -winkel der Leit- und Laufschaufeln. Der Wirkungsgrad der Francisturbine erreicht bei größeren Ausführungen mit günstigen Verhältnissen Werte von 0,78 bis 0,86.

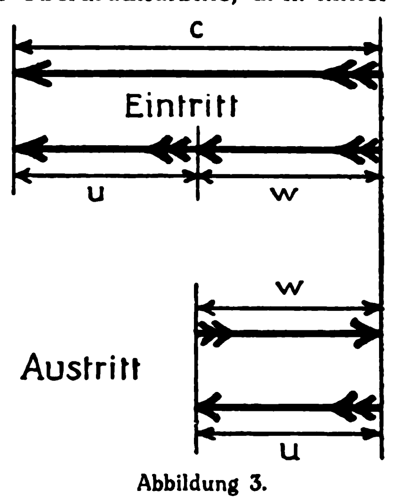


Abbildung 3.

Wozu nun noch diese zwei verschiedenen Arten von Wasserkraftmaschinen? Warum hat man sich nicht für eine der beiden entschieden? Die Besprechung zweier stark verschiedener Fälle von Wasserkraftausnutzung wird die Beantwortung dieser Frage ergeben.

Nehmen wir zuerst an, es sei eine Wasserkraft mit großer Wassermenge und kleinem Gefälle auszunutzen. Wie schon einmal erwähnt, werden heute hohe Drehzahlen verlangt. Will man ein Peltonrad verwenden, so muß bei vorgeschriebener Drehzahl der Durchmesser des Laufrades so gewählt werden, daß zwecks Erreichung guten Wirkungsgrades die Umfangsgeschwindigkeit am Laufradumfang in den genannten Grenzen $u = 0,44 \times c$ bis $u = 0,47 \times c$ bleibt. Der Laufraddurchmesser wird also bei kleinerem Gefälle sehr klein. Man kann dabei schon Schwierigkeiten mit der Anbringung der Schaufelbecher an dem kleinen Umfang haben. Diesem kleinen Laufrad ist nun eine große Wassermenge zuzuführen. Mit einer einzigen Zufuhrstelle, mit einer Düse, wird dies nicht möglich sein, da die Größe der Schaufelbecher durch den kleinen Raddurchmesser beschränkt ist. Der Strahl muß sich auf der Schaufel gut ausbreiten können, damit er seine Geschwindigkeit möglichst restlos abgibt. Die nächste Düse muß am Laufradumfang in solcher Entfernung von der ersten Düse sitzen, daß sie den Strahl in der von der ersten Düse beaufschlagten Schaufel nicht mehr stört. Das Wasser aus der ersten Düse muß die Schaufel schon fast ganz wieder verlassen haben, ehe von einer zweiten Düse beaufschlagt wird. Es ist ersichtlich, daß es gegebenenfalls wegen dieser Rücksichten unmöglich ist, die ganze Wassermenge auf das Rad zu leiten. Außerdem ist die Anwendung mehrerer Düsen konstruktiv nicht einfach, insbesondere weil die Düsen zur Regulierung gleichmäßig verstellt werden sollen. Selbst mit zwei Laufrädern auf der Welle und mehreren Düsen am Umfang der beiden Räder ist vielleicht noch nicht auszukommen. Alle diese Schwierigkeiten fallen bei der Francisturbine weg. Diese verlangt für guten Wirkungsgrad schon höhere Umfangsgeschwindigkeiten. Das Laufrad muß am ganzen Umfang beaufschlagt werden und verschluckt verhältnismäßig große Wassermengen. Schließlich gestattet die Überdruckturbine die Anwendung eines Saugrohres (s. S. 216), wodurch auch der bei kleinem Gesamtgefälle sehr ins Gewicht fallende Bruchteil des Gefälles vom Laufrad bis Unterwasserspiegel ausgenutzt wird.

Wie gestaltet sich die Sache im entgegengesetzten Falle: kleine Wassermenge, großes Gefälle? Wollte man dafür eine Francisturbine mit der für den Wirkungsgrad günstigsten Drehzahl bauen, so wäre diese Drehzahl für die meisten Antriebe zu hoch, selbst für normal gebaute Dynamomaschinen. Bei hohem Gefälle müßte also eine im Verhältnis zum Gefälle sehr langsam laufende Francisturbine gebaut werden, die schlechten Wirkungsgrad und vielleicht Neigung zu Schaufelanfressungen zeigen würde. Die kleine Wassermenge würde kleine Durchflußquerschnitte mit im Verhältnis dazu großen Reibungsflächen zur Folge haben. Bei Anwendung eines Peltonrades fallen hier alle die vorher erwähnten Schwierigkeiten weg. Wie im zuerst besprochenen Falle die Francisturbine, so kann hier das Peltonrad alle seine Vorzüge entwickeln.

Man sieht: die Beibehaltung zweier grundsätzlich in Arbeitsweise und konstruktivem Aufbau verschiedenen Wasserkraftmaschinen ist eine praktisch-wirtschaftliche Notwendigkeit.

Diese durch die natürliche Auslese als heute allein noch lebensfähig erwiesenen beiden Wasserkraftmaschinen dürfen daher einiges Interesse beanspruchen. Eine ausführlichere Besprechung wird nun berechtigt erscheinen und die erwähnten Eigenschaften erklärlich machen.

Auf dem ganzen Wege der Wasserzuleitung, von der Wasserfassung an, dann besonders in der Druckrohrleitung oder in den Kanälen bis zum Eintritt in die eigentliche Wasserkraftmaschine, geht durch Reibung des Wassers an den Wänden und durch Wirbel ein Teil des durch den Höhenunterschied von Oberwasserspiegel bis Unterwasserspiegel gegebenen Gefälles verloren. Nur der übrigbleibende Teil, das Nettogefälle, kann in der Wasserkraftmaschine ausgenutzt werden. Beim Peltonrad verringert sich dieses Gefälle noch um den von Maschinenwelle bis Unterwasserspiegel gemessenen Betrag. In den Zufuhrdüsen des Peltonrades nimmt das Wasser eine Geschwindigkeit an, die dem Nettogefälle entspricht, abzüglich der geringen Reibung (1 bis 3 %) in den Düsen.

Schon schematisch weniger einfach als das Peltonrad und je nach Gefälle und Drehzahl besonders in der Laufradkonstruktion und im äußeren konstruktiven Aufbau recht verschieden ist die Francisturbine.

Je nach Gefälle ist schon die Wasserzuführung zur Turbine verschieden: geschlossen oder offen, d. h. mit Rohrleitung oder in offenem Wasserkasten. Von etwa 10 oder 15 m Gefälle an ist die Wasserfassung und Wasserzuführung durch Druckrohrleitung, wie für Peltonräder, anzuwenden. Bei höheren Gefällen ergibt sich dies schon von selbst durch die Bodengestaltung. Bei weniger hohen Gefällen läßt die Rücksicht auf billigere, mindestens gleich solide Ausführung, wenigstens bei kleineren Wassermengen, eine Rohrleitung dem offenen Wasserkasten vorziehen. An die Druckrohrleitung schließt sich das Turbinengehäuse. Betriebsart, Raumaufteilung, Maschinengröße, Baukosten werden bei der engeren Auswahl der Gehäuseart bestimmend sein. Spätere Bilder zeigen verschiedene Ausführungsmöglichkeiten.

Das Gehäuse führt über zum Leitapparat. Warum überhaupt ein Leitapparat, wenn sowieso am ganzen Laufradumfang Wasser eintritt? Tatsächlich gibt es vereinzelte kleine minderwertige Turbinen ohne Leitrad. Selbstverständlich preßt der Gefälledruck das Wasser auch durch eine Turbine ohne Leitrad, aber es ist leicht vorzustellen, daß die Wasserbewegung beim Laufradeintritt dabei keine geregelte sein kann, daß sehr starke Wirbelungen auftreten, die einen recht großen Teil des Gefälles aufzehren. Der Wirkungsgrad einer solchen Turbine wäre äußerst schlecht. In der schematischen Abbildung 1 ist ein Leitrad gezeichnet und gezeigt, daß der Wassereintritt in das Laufrad in der durch c_1 angedeuteten Richtung stattfindet. Der Laufradumfang hat eine Geschwindigkeit u_1. Die Abbildung 1 ergibt relativ gegen das Laufrad eine Geschwindigkeit w_1. Sind nun die Laufradschaufeln in der w_1 entsprechenden Richtung gestellt, so ist beim Laufradeintritt eine Störung der Wasserbewegung nach Möglichkeit vermieden. Zugleich bietet aber ein solcher Leitapparat, entsprechend konstruiert, einen weiteren sehr wichtigen Vorteil: er gestattet, den Wasserzulauf zum Turbinenlaufrad zu regulieren, d. h. bei konstantem Gefälle vor der Turbine und konstanter Drehzahl der Maschine die verarbeitete Wassermenge zu verändern und in einer Richtung zuzuführen, die möglichst guten Wirkungsgrad ergibt. Beim Peltonrad ist die Regulierung durch teilweises Schließen der Düse noch einfacher. Durch das Laufrad hindurch nimmt das Wasser den in Abbildung 1 durch Pfeile angedeuteten Weg und tritt in das Saugrohr über. Trotz der im Aufriß ersichtlichen längeren Laufradaustrittskante gegenüber der kürzeren Laufradeintrittskante ist der Austrittsquerschnitt des Laufrades kleiner als der Eintrittsquerschnitt, d. h. die Geschwindigkeit des Wassers innerhalb des Laufrades gegenüber den Schaufelkanälen, die relative Geschwindigkeit, muß sich von w_1 auf w_2 vermehren, weil die Schaufelkanäle sich in radial-axialer Richtung stark verengen. War also beim Leitradaustritt nur

ein Teil des Gefälles in Geschwindigkeit verwandelt, so wird nun hier im Laufrad auch noch der Rest des Gefälles dazu verwendet, um das Wasser durch das Laufrad gegen die Achse zu hindurchzupressen, um die relative Geschwindigkeit w_1 auf w_2 zu vergrößern und die Reibung des Wassers an den Wänden der Schaufelkanäle zu überwinden. Der in radialer Richtung senkrecht zur Drehachse geführte Schnitt (Grundriß der Abbildung 1) zeigt außer der Verengung der Schaufelkanäle in radialer Richtung auch noch eine Krümmung der Kanäle, wodurch eine Austrittsrichtung der relativen Austrittsgeschwindigkeit w_2 bedingt wird, wie sie in der Abbildung ersichtlich ist. Durch Zusammensetzen der relativen Austrittsgeschwindigkeit mit der Umfangsgeschwindigkeit am Austritt ergibt sich eine absolute Austrittsgeschwindigkeit c_2 nach Abbildung 1, die ohne besondere Maßnahmen als verloren angesehen werden muß. Es ist ersichtlich, daß eine Geschwindigkeitsablenkung und Geschwindigkeitsänderung von c_1 auf c_2 stattgefunden hat; gerade dadurch fand die Übertragung der Energie auf das Laufrad der Turbine statt. Nach dem Laufradaustritt wird das Wasser allmählich dem Unterwasserkanal zugeführt. Wäre nun der Rest des Gefälles vom Laufradaustritt bis Unterwasserspiegel wie beim Peltonrad verloren, so möchte dies bei den für Francisturbinen auch noch in Betracht kommenden kleinen Gefällen einen großen Teil ausmachen, gegebenenfalls mehr als die Hälfte des verfügbaren Gefälles. Es könnten dann nur sehr kleine Wirkungsgrade erzielt werden. Dem ist aber nicht so. Dieser Teil des Gefälles, das Sauggefälle, kam im Laufrad ebenso zur Wirkung, wie der über dem Laufrad stehende Teil des Gefälles, wie das Druckgefälle. Um dies zu erreichen, ist ein Saugrohr angebracht, das sich unter dem Laufrad befindet. Wie wirkt nun das Saugrohr? Man weiß, daß der atmosphärische Luftdruck einer Quecksilbersäule von rund 760 mm Höhe oder eine Wassersäule von rund 10,3 m Höhe das Gleichgewicht hält, wenn über der betreffenden Flüssigkeitssäule Vakuum herrscht: das Prinzip des Barometers. Zur weiteren Erklärung denken wir uns eine Vorrichtung nach Abbildung 4 gebaut; es ist z. B. ein Gefälle von Oberwasser- bis Unterwasserspiegel von 18 m vorhanden. Auf einer Höhe von 11 m über dem Unterwasserspiegel soll die Druckrohrleitung in einer Düsenmündung enden, und an dieser Stelle will man zugleich auf irgendeine Weise die Geschwindigkeit des aus der Düse austretenden Wasserstrahls messen. Ist nun die Vorrichtung ohne weitere Anschlüsse einfach wie Abbildung 4 gebaut, so wird die Geschwindigkeit am Austrittsende der Düse infolge Reibungen vernachlässigt, einem Gefälle von 18—11 = 7 m entsprechen, $c = \sqrt{2g \times 7}$ sein. Anders wird dies aber, wenn wir nun nach Abbildung 5 ein zylindrisches Rohr, ein Saugrohr, hinter der Düse anschließen. Ist die ganze Leitung mit Wasser gefüllt, Leitung und Wasser luftfrei, und wird die luftdichte Leitung jetzt an der Düse geschlossen, so sinkt die Wassersäule im Saugrohr so weit, bis sie nur mehr so hoch steht, daß sie dem auf den Unterwasserspiegel drückenden atmosphärischen Luftdruck das Gleichgewicht hält, also bis auf 10,3 m Höhe über dem Unterwasserspiegel. In dem Raume zwischen Düse und diesem neuen Wasserspiegel, also

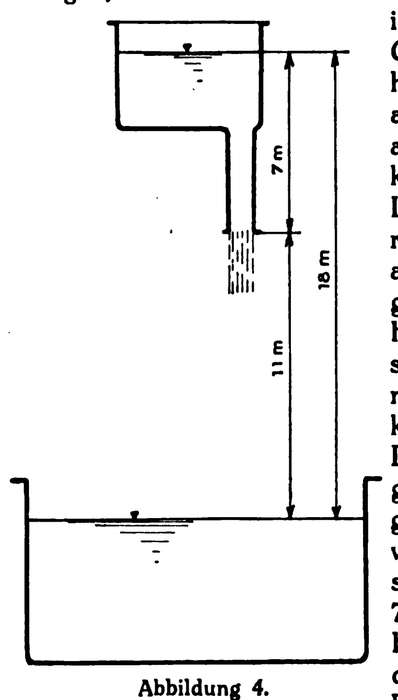


Abbildung 4.

auf einer Höhe von 11—10,3 = 0,7 m Höhe, wird dann Vakuum herrschen. Öffnet man wieder die Düse, so wird das Wasser nicht, wie vorher bei einer Vorrichtung nach Abbildung 4, in einen Raum von gewöhnlichem atmosphärischem Luftdruck ausströmen, sondern in einen Raum von Unterdruck. Es ist nicht nur ein Druckgefälle von 18—11 = 7 m, sondern auch noch ein Sauggefälle, entsprechend der Druckdifferenz von atmosphärischem Luftdruck bis Vakuum, das einer Quecksilbersäule von 760 mm oder einer Wassersäule von 10,3 m Höhe entspricht, also im ganzen ein Gefälle von $7 + 10{,}3 = 17{,}3$ m verfügbar, welches eine Geschwindigkeit von $c = \sqrt{2g \times 17{,}3}$ erzeugt. Diese Geschwindigkeit würde man am Düsenaustritt auch messen. Was haben wir also durch die Anbringung des Saugrohrs erreicht? Wir können, was aus baulichen und betriebstechnischen Gründen oft recht erwünscht ist, unsere Vorrichtung (Maschine) in einem gewissen Bereiche beliebig hoch über dem Unterwasser — hochwasserfrei — aufstellen, ohne deswegen Gefälle einzubüßen. In obiger Vorrichtung nach Abbild. 5 wäre nur ein Gefälleverlust von Düsenmündung bis Saugspiegel = 11 — 10,3 = 0,7 m vorhanden, sofern wir nur die Geschwindigkeit unmittelbar am Düsenende messen. Wenn auch noch dieser nutzlose Gefällebruchteil vermieden wird, so haben wir eine Vorrichtung, die, obwohl 10,3 m über Unterwasserspiegel angebracht, doch eine Düsenaustrittsgeschwindigkeit entsprechend dem ganzen Gefälle bis zum Unterwasserspiegel ergibt. Bei einer praktischen Ausführung wäre nun allerdings in Rücksicht zu ziehen, daß das Wasser immer etwas Luft enthält und die Leitungen nie ganz luftdicht sind. Dies in Rechnung gezogen, kommt man zu einer Saughöhe von nur 6 bis höchstens 7,5 m. Jede Überdruckturbine ist nun eine Art Düse und daher für die Anwendung eines Saugrohrs ohne weiteres geeignet. Gewöhnlich wird das Saugrohr nach unten zu konisch erweitert, die Geschwindigkeit des Wassers verringert sich demgemäß, und es wird weniger Energie in Form von Geschwindigkeit nutzlos in den Unterwassergraben abgegeben. Häufig besteht das Saugrohr in einem Betonkrümmer, dessen Nutzen auf den gleichen Gesetzen beruht wie die eines gewöhnlichen Saugrohrs und nur eine noch bequemere Überführung des Wassers in die Abflußrichtung gestattet. Die Anwendungsmöglichkeit des Saugrohrs ist auch beim Peltonrad gegeben, es muß nur durch automatische Anlüftung dafür Sorge getragen werden, daß das Wasser nie so hoch steigt, daß das Laufrad drin waten müßte. Doch sind solche Vorrichtungen in Rücksicht auf die Betriebssicherheit nicht sehr beliebt. Es ist aber auch bei den hohen Gefällen, für welche das Peltonrad in Verwendung kommt, die Ausnutzung des ganzen Gefälles bis auf so kleine Beträge nicht von großer Wichtigkeit.

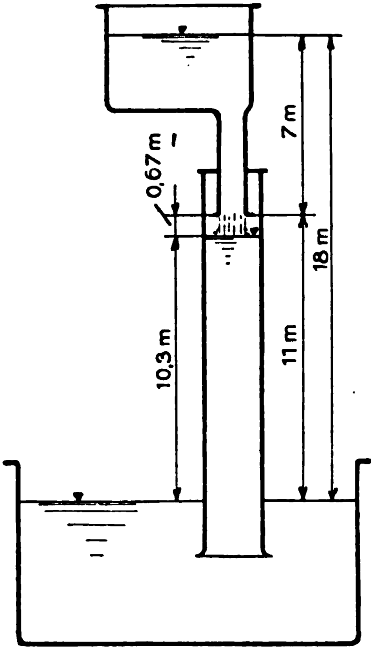


Abbildung 5.

Eine für alle Wasserturbinen gültige allgemeine Bemerkung ist noch zu machen. Es ist sinnlos, von soundso viel Pferdestärken oder von einer Drehzahl pro Minute oder einer Wassermenge pro Sekunde der Turbine zu sprechen, ohne gleichzeitig eine Angabe damit zu verknüpfen, für welches Gefälle diese Zahlen gelten sollen. Schon auf S. 211 wurde darauf hingewiesen, daß die in der gegebenen Wasserkraft verfüg-

bare Energie durch das Produkt Wassermenge $\times$ Gefälle zu messen ist, also durch zwei Größen. Die von einer Turbine verarbeitete Wassermenge ist nun, wie auch alle Geschwindigkeiten, proportional $\sqrt{H}$, so daß ein und dieselbe Turbine in vierfachem Gefälle nur die doppelte Wassermenge verarbeiten kann bei doppelter Drehzahl. Da die Energie proportional dem Produkt aus Wassermenge $\times$ Gefälle ist, die von der Turbine verarbeitete Wassermenge aber proportional $\sqrt{H}$ sein wird, so ändert sich also die Leistung einer Turbine mit dem Produkt $H \times \sqrt{H}$, wenn das Gefälle geändert wird. Noch einmal übersichtlich zusammengestellt ist also:

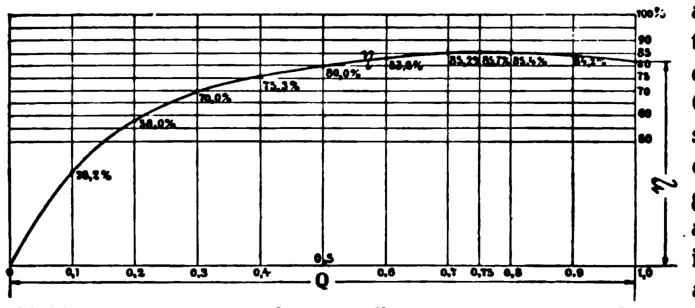


Abbildung 6. Wirkungsgradkurve einer Francisturbine.
Nach J. M. Voith, Heidenheim a. d. Brenz.

Wassermenge Q	proportional	$\sqrt{H}$
Drehzahl n	„	$\sqrt{H}$
Leistung N	„	$H \times \sqrt{H}$

Der Zweck der Leitapparate bei Francisturbinen und Peltonrädern ist schon besprochen. Eine Verringerung der Wassermenge hat nun aber nicht nur eine proportionale Verkleinerung der Leistung zur Folge, sondern die Leistung sinkt noch stärker, weil der Wirkungsgrad der Turbine bei verkleinerter Wassermenge sich verschlechtert. Diese Verschlechterung rührt teils von den ungünstigeren Durchflußverhältnissen der verringerten Wassermenge in der Turbine her, teils von der prozentualen Vergrößerung (im Verhältnis zur verkleinerten Wassermenge) der absolut gleich groß bleibenden Verluste.

In den Abbildungen 6 u. 7 ist die Änderung des Wirkungsgrades einer Francisturbine bzw. eines Peltonrades bei Verkleinerung der für die Turbine normalen Wassermenge zu überblicken. Das Peltonrad verhält sich dabei günstiger, wie Abbildung 7 zeigt. Was die Gefälle anbetrifft, die durch die Turbinentypen ausgenutzt werden können, so ist technisch der Bereich fast unbegrenzt, selbstverständlich vorausgesetzt, daß für die kleineren Gefälle Francisturbinen, für die größeren Peltonräder verwendet werden. Es sind im praktischen Betriebe Gefälle von 0,5 bis 170 m in Francisturbinen, bis 1000 m in Peltonrädern zur Verwertung gelangt. Dementsprechend und nach der Wassermenge umfassen auch die Leistungen von Turbinen einen weiten Bereich. Eine der größten Leistungen in einem einzigen Francisturbinenlaufrad ist wohl die von 18000 P. S. bei 160 m Gefälle in einem Kraftwerk der Great Western Co.

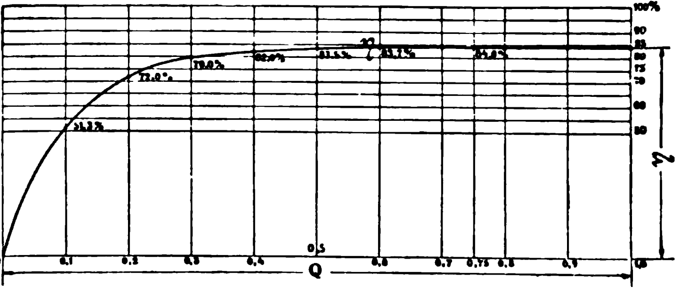


Abbildung 7. Wirkungsgradkurve eines Peltonrades.
Nach J. M. Voith, Heidenheim a. d. Brenz.

Nun zu den konstruktiven Einzelheiten.

DIE KONSTRUKTIVE AUSBILDUNG DER WASSERKRAFTMASCHINEN. Die konstruktive Ausbildung moderner Francisturbinen und Peltonräder soll an Hand von typischen Ausführungen erstklassiger Firmen besprochen werden. Es wird dabei besondere Beachtung auf normale Bauarten gelegt, die weiteste Verbreitung und größte Bedeutung haben.



Abbildung 8. Laufrad eines Langsamläufers. Gebaut von Briegleb, Hansen & Ko., Gotha.

a) Francisturbinen. Die Abbildungen 8, 9, 10 u. 11 zeigen Laufräder der Firma Briegleb, Hansen & Co. (Gotha). Auf früheres verweisend, sei nochmals kurz erwähnt, daß Langsamläufer bei verhältnismäßig großen Gefällen und kleinen Wassermengen (und kleinen Drehzahlen), Schnelläufer bei kleineren Gefällen und großen Wassermengen (und großen Drehzahlen) gebraucht werden. Die Bilder lassen die Blechschaufeln deutlich erkennen, die in gußeiserne Radkränze eingegossen sind. Nur bei hohen Gefällen sind die Schaufeln zusammen mit den Radkränzen aus Bronze oder Stahlguß gegossen. Die Blechschaufeln werden in besonderen Preßformen gebogen. Die Erprobung der für den Wirkungsgrad einer Turbine günstigsten Schaufelform ist die Hauptaufgabe der kostspieligen Versuchsanstalten, die hervorragende Firmen wie Briegleb, Hansen & Co. (Gotha) und J. M. Voith (Heidenheim a. d. Brenz) sich errichtet haben.

Abgesehen vom Wirkungsgrad spielt die richtige Wahl der Schaufelwinkel in Leit- und Laufrad und der Schaufelform besonders bei hohen Gefällen noch eine wichtige Rolle wegen der Gefahr von Anfressungen. Außer bei sandhaltigem Wasser sind hohe Gefälle und damit größere Wassergeschwindigkeiten nur indirekt die Ursache der Zerfressungen von Francislaufrädern. Der Zusammenhang ist der, daß, wie schon früher bemerkt, die für die meisten Antriebszwecke verlangte Drehzahl im Vergleich zu solch hohen Gefällen verhältnismäßig niedrig liegt. Das Francislaufrad muß durch Wahl abnormaler Schaufelwinkel gezwungen werden, diese Drehzahl zu ergeben, muß als Langsamläufer gebaut werden. Die damit bedingte Form der Schaufelkanäle ergibt niedrigen Wasserdruck im Laufrade und begünstigt das Entstehen von Wasserwirbeln. Bei den niedrigen Wasserdrücken und in den Wirbeln scheidet der vom Wasser absorbierte Sauerstoff aus und greift in diesem Moment, stark chemisch wirkend, das Schaufelmaterial an. Es gab Wasserkraftanlagen, in denen die Laufräder, selbst wenn aus Bronze oder Stahlguß, schon nach einigen Monaten ausgewechselt werden mußten und erst nach gänzlicher Änderung der Schaufelform Abhilfe geschaffen werden konnte.



Abbildung 9. Laufrad eines Normalläufers. Gebaut von Briegleb, Hansen & Ko., Gotha.

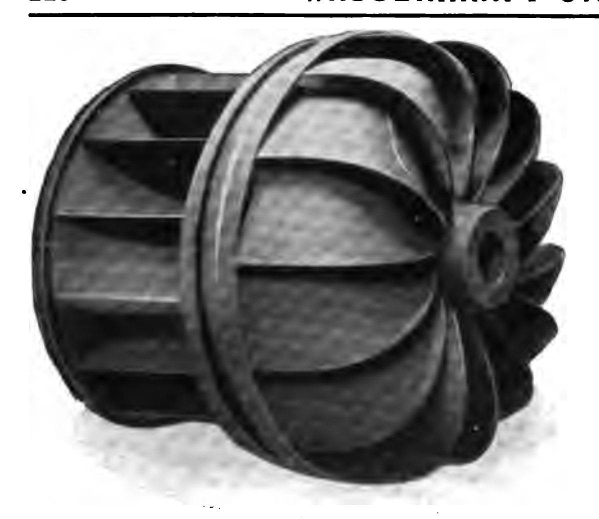


Abbildung 10. Laufrad eines Schnelläufers. Gebaut von Briegleb, Hansen & Ko., Gotha.



Abbild. 11. Laufrad eines Oberschnelläufers. Gebaut von Briegleb, Hansen & Ko., Gotha.

Die Zuführung des Wassers zum Laufrad erfolgt durch das Leitrad. Abbildung 12 stellt ein Leitrad dar. Vorn ist eine Leitradschaufel herausgenommen, die in der



Abbildung 12. Leitapparat einer Francisturbine. Gebaut von Briegleb, Hansen & Ko., Gotha.

Mitte oben eine Öffnung zeigt, durch welche der Leitschaufelbolzen gesteckt wird. Dieser Bolzen ist in der oberen und unteren Begrenzungswand des Leitrades gehalten.

Die Leitschaufel kann sich um ihn drehen. An den oben in die Leitschaufeln eingesetzten Schraubenbolzen greifen gekrümmte Lenkstangen an, die, am inneren Ende gefaßt, durch weitere Vorrichtungen bewegt werden. Die im Bilde ersichtlichen starken vertikalen Bolzen dienen zur gegenseitigen Befestigung der Leitradbegrenzungswände. Wie aus der früheren schematischen Abbildung 1 leicht verständlich, wird durch Drehen der Leitschaufeln um den Leitschaufelbolzen der Durchflußquerschnitt im Leitrade vergrößert oder verkleinert. Es kann also damit die dem Laufrad zugeführte Wassermenge geändert werden. Die noch später zu besprechenden Abbildungen 20, 21, 23 zeigen eine etwas andere konstruktive Lösung der Leitschaufelbewegung. Dabei greifen an den Schaufeln kurze Lenker an, die an einem Ring (Regulierring) befestigt sind. Der Regulierring wird durch zwei Stangen von einer Regulierwelle aus gedreht. Grundsätzlich schon im Schema lassen andere Leitapparate sich wohl denken, wurden auch früher, z. B. Axialschieber, d. i. ein axial am Laufradeintritt verschiebbarer zylindrischer Blechschieber, ausgeführt, sind aber hauptsächlich wegen der verschlechterten Wasserführung heute gänzlich verlassen.

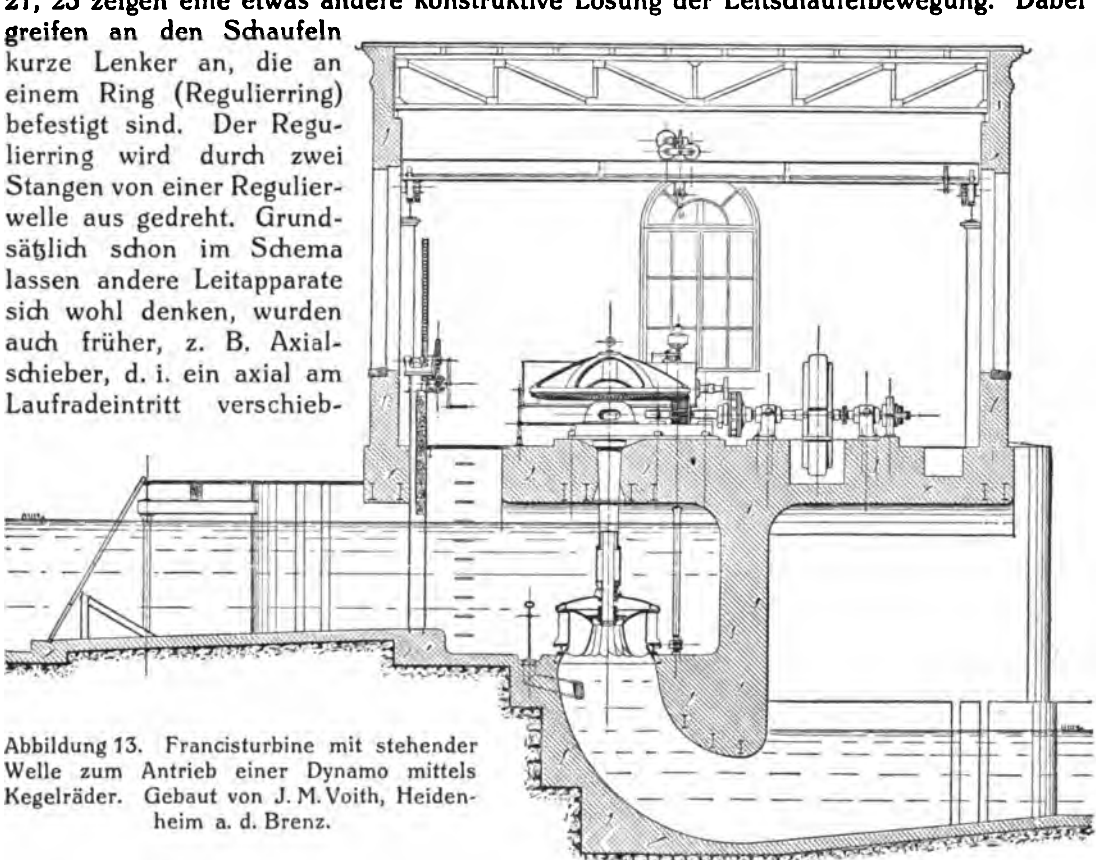
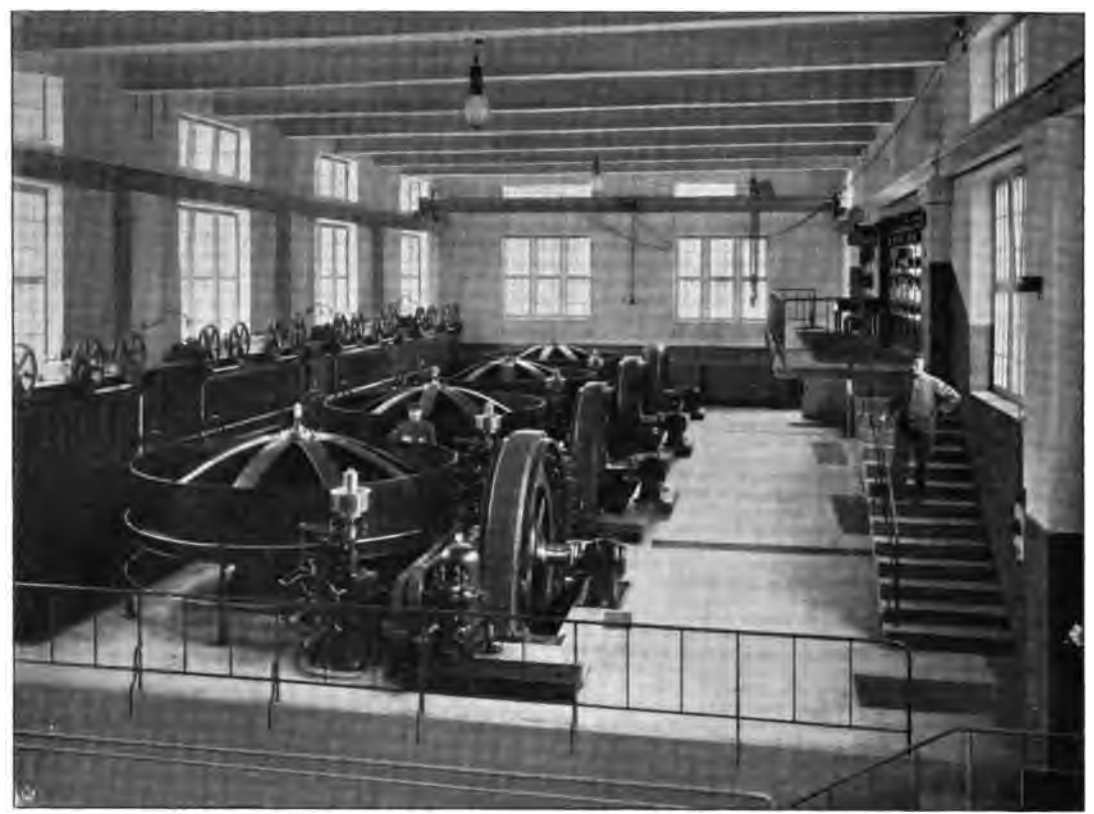


Abbildung 13. Francisturbine mit stehender Welle zum Antrieb einer Dynamo mittels Kegelräder. Gebaut von J. M. Voith, Heidenheim a. d. Brenz.

Abbildung 13 bietet den Aufriß einer „vertikal offenen“ Francisturbine samt Einbau. Unten ist das Laufrad, das Leitrad, dann die Turbinenwelle ersichtlich, oben das eine Kegelrad, das, in ein zweites eingreifend, die Leistung auf eine horizontale Welle überträgt. Zugleich ist auf diesem Bilde links noch ein Teil des Oberwasserkanals, der Rechen zur Abfangung von mitschwimmenden Körpern, die Schütze in offener Stellung und rechts der Anfang des Unterwasserkanals zu sehen. Das Betonsaugrohr führt das aus der Turbine austretende Wasser allmählich in den Unterwasserkanal über. Das große Kegelrad ist hier über der horizontalen Welle angeordnet, weil diese Welle nur von einer einzigen Turbine angetrieben wird. In der



Abbild. 14. Zentrale Wiblingen mit vier Francisturbinen. Turbinen von J. M. Voith, Heidenheim a. d. Brenz.

Wasserkammer ist eine Klappe, die, geöffnet bei geschlossener Einlaßschütze, das noch in der Turbinenkammer angesammelte Wasser abfließen läßt.

Abbildung 14 gibt eine Ansicht einer Zentrale, die der Anordnung von Abbildung 13 entspricht. Es ist die Zentrale Wiblingen der Stadt Ulm a. D. Gefälle 3,2 m, Drehzahl pro Minute = 250; Leistung einer Turbine 337 P. S. Ein später noch zu besprechender Druckölregulator ist bei jeder Turbine zu sehen. Links vor jeder Turbine sind die Einlaßschützen, die den Abschluß der Turbinenkammern ermöglichen. Hochwasserfreie Aufstellung der Dynamomaschinen durch Anordnung senkrechter Welle bietet auch die Aufstellung nach Abbildung 15, bei der, im Gegensatz zu Abbildung 13, das große Kegelrad unter der horizontalen Welle sitzt. Die horizontale Welle trägt hier noch ein Schwungrad. Die Abbildung 15 ist ein Schnitt durch das Licht- und Kraftwerk Seydellsche Mühlen in Guben mit drei Francisturbinen, die unter 4,5 m Gefälle 1200 P. S. leisten.

Ebenfalls offenen Wasserkasten und vertikale Welle, aber direkte Verbindung mit der Dynamomaschine bietet Abbildung 16. Hier sitzen zwei Laufräder, wegen des direkten Antriebes Schnelläufer, auf einer Welle und gießen in ein gemeinsames Blechsaugrohr aus, das zum Unterwassergraben führt. Unter dem Maschinenhausboden ist ein Schwungrad angebracht zur Verhinderung zu großer Drehzahlschwankung bei Änderung der Kraftabgabe. Oben im Maschinenhaus ist die Dynamomaschine hochwasserfrei aufgestellt. Die Anlage ist gebaut für die Firma Moses Löw Beer in Sagan und besteht aus zwei Maschinen von je 300 P. S. Leistung bei einer Drehzahl

von 175 in einem Gefälle von rund 5 m. Vertikale Welle und gußeisernen Ablaufkrümmer, an den dann ein Blechsaugrohr anschließt, hat die Turbine Abbildung 17, gebaut für die Zentrale Skotfos in Norwegen. Gefälle 7 m, Drehzahl = 150; Leistung 600 P.S. Besonders gut ist der Antrieb der Regulierringe von einer seitlichen Welle aus durch je zwei Stangen ersichtlich.

Nun einige Bauarten mit horizontaler Welle. Eine sehr typische Anordnung (Abbildung 18 u. 19) stellt das Leitrad in den offenen Wasserkasten und führt in gußeisernem Krümmer auf der Maschinenhausseite das Wasser dem Blechsaugrohr zu. Abbildung 18 zeigt noch ein Schwungrad und die Riemenscheiben zur Übertragung der Leistung auf eine andere Welle.

Eine Zwillingsturbine, zwei Laufräder auf einer Welle mit einem gemeinschaftlichen Ablaufkrümmer, zeigt Abbildung 20.

Ebenfalls zwei Laufräder auf einer Welle, aber jedes Laufrad mit eigenem Ablaufkrümmer hat die Doppelturbine der Abbildung 21. Der Vorteil dieser Bauart liegt darin, daß sie zur Anschmiegung an wechselnde Wassermenge zwei Laufräder gleicher Drehzahl, aber für verschiedene Wassermenge gebaut, enthält. Es kann die hintere Turbine, die in einer eigenen Wasserkammer steht, bei zu geringer Wassermenge geschlossen und auch noch abgekuppelt werden.

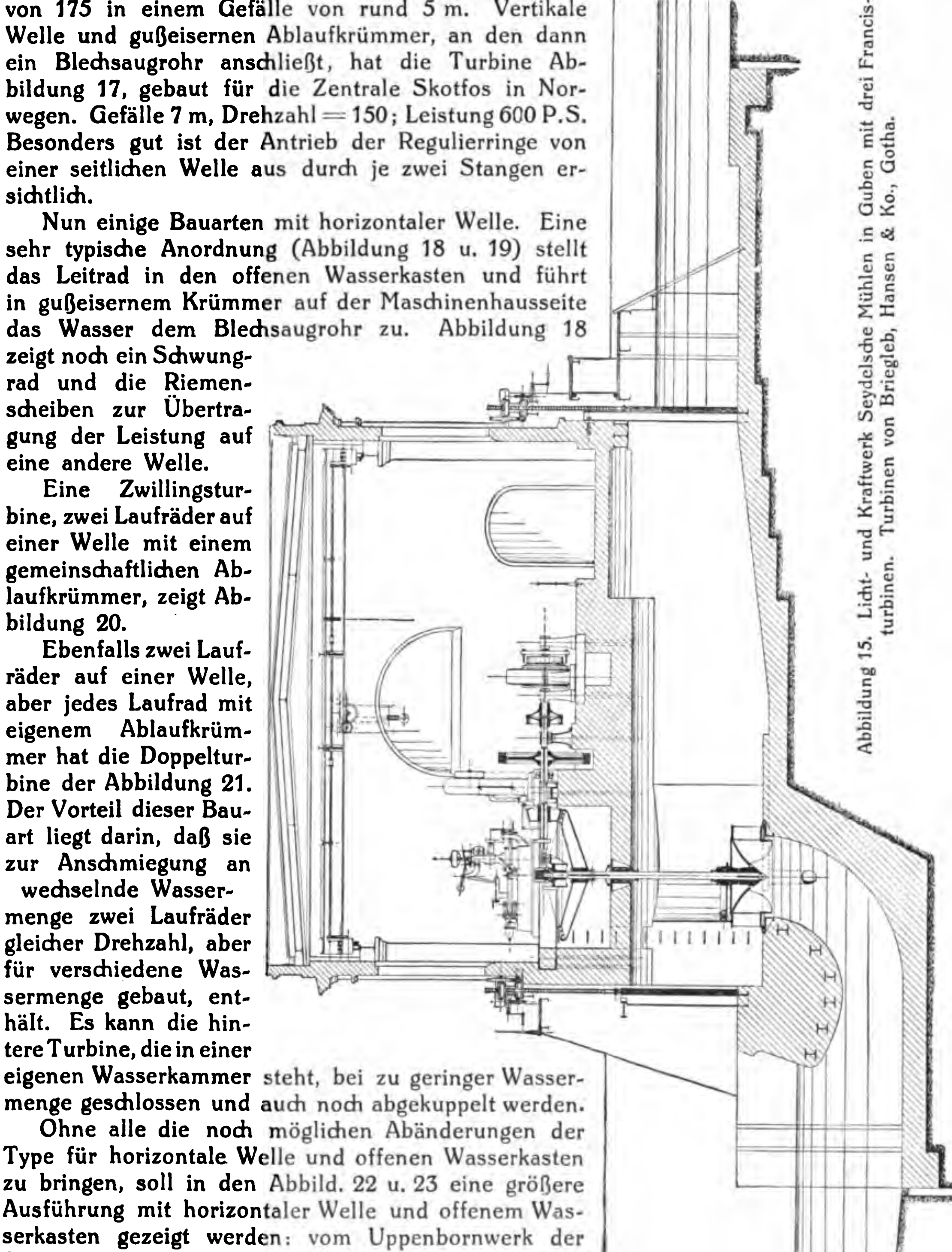
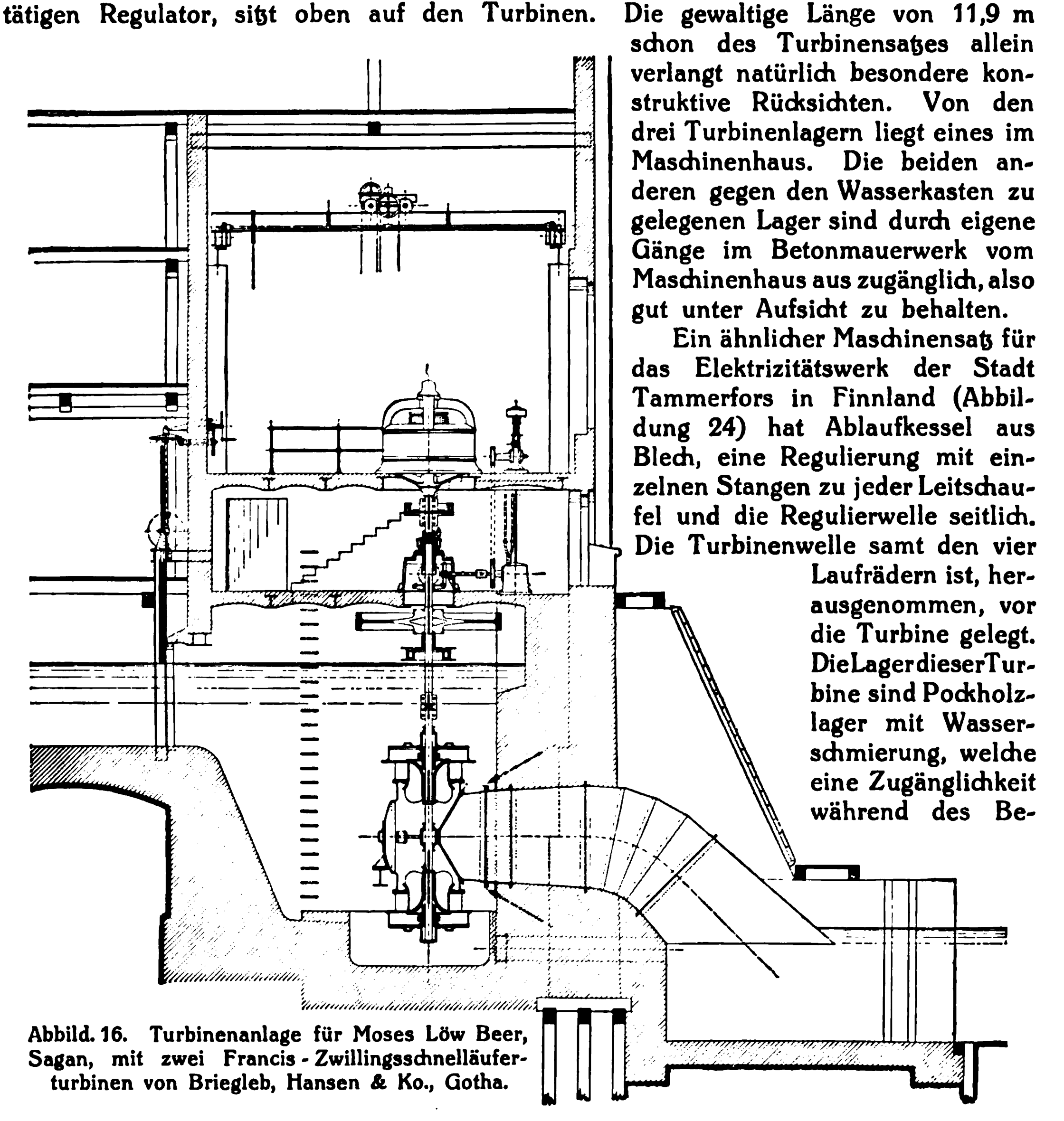


Abbildung 15. Licht- und Kraftwerk Seydelsche Mühlen in Guben mit drei Francisturbinen. Turbinen von Briegleb, Hansen & Ko., Gotha.

Ohne alle die noch möglichen Abänderungen der Type für horizontale Welle und offenen Wasserkasten zu bringen, soll in den Abbild. 22 u. 23 eine größere Ausführung mit horizontaler Welle und offenem Wasserkasten gezeigt werden: vom Uppenbornwerk der Stadt München. Bei 7,9 m Gefälle und 150 Touren

pro Minute liefert der dargestellte Maschinensatz 1887 P.S. Die Zentrale erhält drei solche Maschinensätze. Je zwei Zwillingsturbinen sind gekuppelt, so daß also je vier Laufräder den Generator treiben. Die Regulierwelle, verstellt von einem selbsttätigen Regulator, sitzt oben auf den Turbinen. Die gewaltige Länge von 11,9 m schon des Turbinensatzes allein verlangt natürlich besondere konstruktive Rücksichten. Von den drei Turbinenlagern liegt eines im Maschinenhaus. Die beiden anderen gegen den Wasserkasten zu gelegenen Lager sind durch eigene Gänge im Betonmauerwerk vom Maschinenhaus aus zugänglich, also gut unter Aufsicht zu behalten.



Abbild. 16. Turbinenanlage für Moses Löw Beer, Sagan, mit zwei Francis-Zwillingsschnelläuferturbinen von Briegleb, Hansen & Ko., Gotha.

Ein ähnlicher Maschinensatz für das Elektrizitätswerk der Stadt Tammerfors in Finnland (Abbildung 24) hat Ablaufkessel aus Blech, eine Regulierung mit einzelnen Stangen zu jeder Leitschaufel und die Regulierwelle seitlich. Die Turbinenwelle samt den vier Laufrädern ist, herausgenommen, vor die Turbine gelegt. Die Lager dieser Turbine sind Pockholzlager mit Wasserschmierung, welche eine Zugänglichkeit während des Betriebes nicht erfordern. Die Daten sind: 5,3 m Gefälle, 275 Umdrehungen, 336 P.S. pro Turbine.

Von etwa 8 oder 10 m Gefälle an erfolgt die Wasserzuführung mit Rohrleitung, die Turbine sitzt dann in einem Gehäuse.

Wasserzuführung in Richtung der Welle hat die Turbine (Abbildung 25) der Zentrale Molinar in Spanien für 66 m Gefälle, 7200 P.S. bei einer Drehzahl von 428. Das Bild zeigt das Äußere des Gehäuses und im Vordergrund den Regulator, der

durch die schräg nach aufwärts geführte Stange und den anschließenden Hebel die Regulierwelle, die innen im Gehäuse liegt, bedient.

Rohranschluß oben am Gehäuse hat die Turbine der Abbildung 26. Hier ist zugleich der Einlauf in die Rohrleitung mit Rechen und Schütze zu sehen.

Seitlichen Rohranschluß besitzt die Turbine (Abbildung 27) der Zentrale Svaelgfos (Norwegen), die für ein Gefälle von 46 m und eine Leistung von 11750 P.S. bei einer Drehzahl von 250 gebaut ist. Im Innern des Gehäuses ist der eine Leitapparat der Zwillingsturbine und der gußeiserne Ablaufkrümmer für beide Laufräder zu sehen.

Die am häufigsten angewandte Bauart bei Wasserzuführung durch eine Rohrleitung ist die der Spiralturbine. Der Name kommt von der Gehäuseform. Die Abbildung 28 zeigt eine Spiralturbine.

Abbildung 17. Zwillings-Francisturbine mit stehender Welle für die Zentrale Skotfos. Turbinen von J. M. Voith, Heidenheim a. d. Brenz.

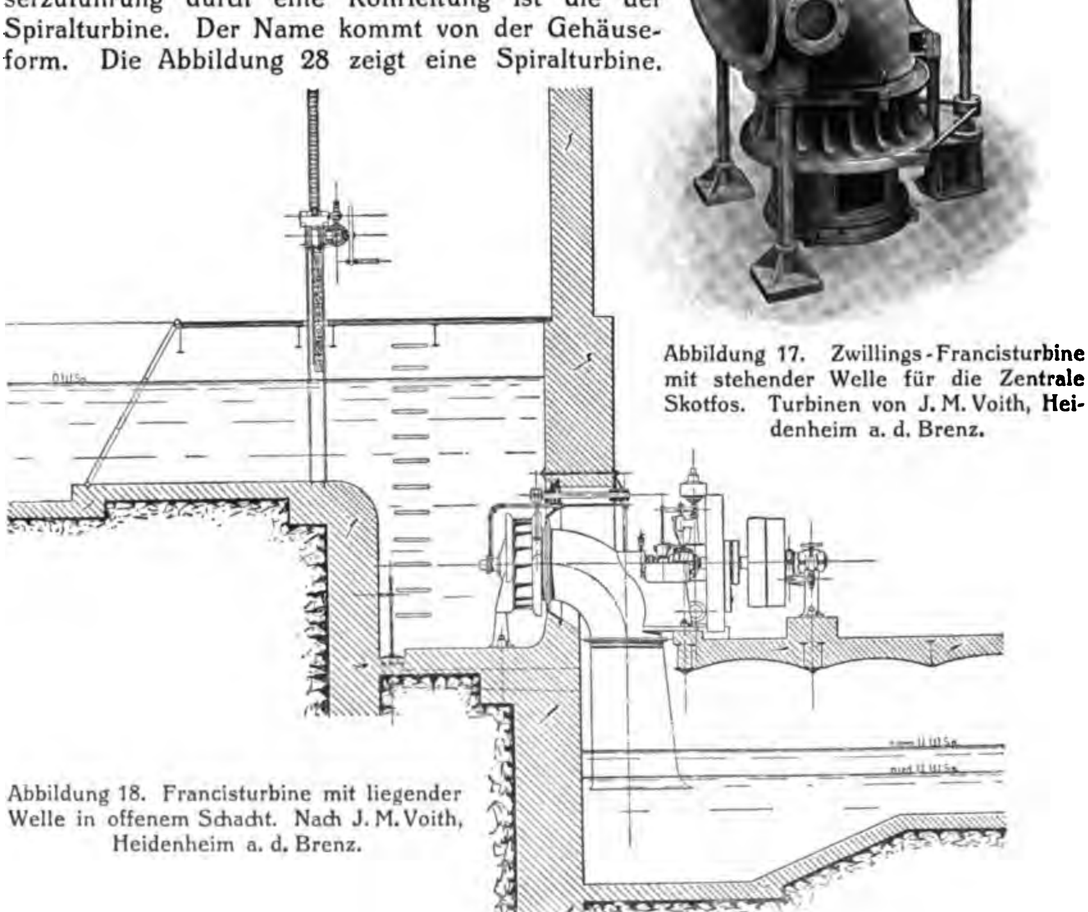


Abbildung 18. Francisturbine mit liegender Welle in offenem Schacht. Nach J. M. Voith, Heidenheim a. d. Brenz.

Die Regulierung wird durch ein Handrad rechts betätigt. Durch Hebel wird der Regulierring bewegt, welcher an kleinen radial nach außen stehenden Hebeln angreift, die an den Leitschaufelbolzen sitzen. Die Leitschaufeln bestehen bei dieser Kon-



Abbildung 19. Francisturbine mit liegender Welle in offenem Schacht. Gebaut von J. M. Voith, Heidenheim a. d. Brenz.

struktion mit den Leitschaufelbolzen aus einem Stück, so daß sie zugleich mit diesen Bolzen verdreht werden. Am Gehäuseende unten ist ein Absperrschieber, der durch das Handrad links bewegt wird. Der vorn sichtbare Ablaufkrümmer führt das Wasser dem Saugrohr zu. Die Regulierung der Spiralturbine Abbildung 29 wird von einem selbsttätigen Regulator verstellt, der rechts sichtbar ist. Die Welle trägt hinten ein schweres Schwungrad. Der Ablaufkrümmer ist, nicht sichtbar, hinter dem Gehäuse. Der Schieberantrieb geschieht durch das große Handrad rechts vorn. Die am vorderen Lager angebauten Rohre dienen zur Schmierung bzw. Wasserkühlung des Lagers.

Eine gewaltige Zwillingsspiralturbine der Ontario Power Co., Niagara Falls, U. S. A. für eine Leistung von 12000 P. S. bei 53,4 m Gefälle und 187 Touren zeigt Abbildung 30. Es nehmen zwei Spiralblechgehäuse das Wasser auf, das die Laufräder an einen Doppelkrümmer zwischen den beiden Gehäusen abgeben. Die Regulierwelle liegt vorn am Fundament.

Mit den gegebenen Beispielen soll die Reihe der konstruktiven Ausführungen und baulichen Anordnungen von Francisturbinen geschlossen werden, um zu den Peltonrädern überzugehen.

b) Peltonräder. Die unter dem Namen Peltonräder und Löffelräder auf den Markt gebrachten Freistrahl-Turbinen haben nach Schaufel- und Düsenform vielerlei verschiedene Ausführungen aufzuweisen. Nur einige der verbreitetsten und neuesten Ausführungsformen sollen eine Vorstellung von der

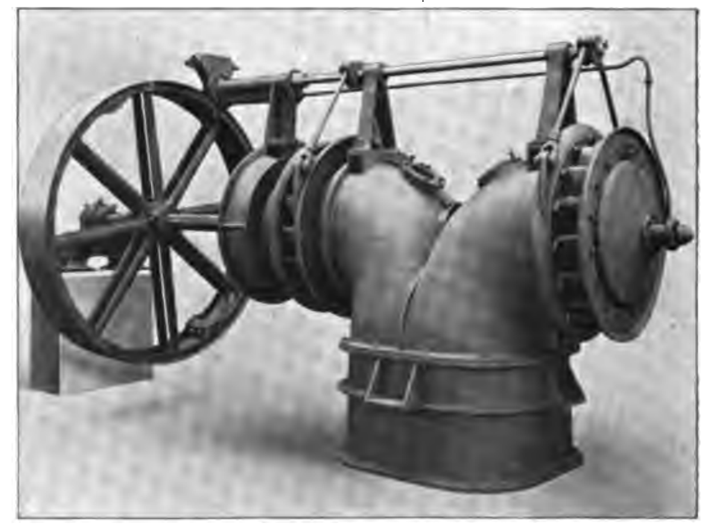


Abbildung 20. Zwillings-Francisturbine mit liegender Welle in offenem Schacht. Gebaut von Briegleb, Hansen & Ko., Gotha.

konstruktiven Ausgestaltung dieser Maschine ermöglichen. Verschiedene Ansichten einer Freistrahlschaufel gibt Abbildung 31. Die Schneide in der Mitte der Schaufel teilt den Wasserstrahl, der nach beiden Seiten abfließt und sich über die Schaufel hin ausbreitet, wobei er seine Energie abgibt. Ein Rad mit solchen Schaufeln zeigt die Abbild. 32.

In Abbildung 33 ist ein großes Rad, mit ähnlichen Schaufeln besetzt, dargestellt.

Vom einfachsten Zusammenbau mit einer Düse, die der in der schematischen Abbildung 2 ähnlich ist, gibt Abbildung 34 eine Ansicht.



Abbildung 21. Francis-Doppelturbine mit liegender Welle in offenem Schacht. Gebaut von Briegleb, Hansen & Ko., Gotha.

Bei größerer Wassermenge kann es nötig sein, zwei Laufräder auf eine Welle zu setzen. Eine solche Maschine, die dann natürlich auch zwei nebeneinanderliegende Düsen hat, ist in Abbildung 35 dargestellt. Abbildung 36 zeigt die Welle mit den zwei Laufrädern dieser Turbine, die bei 125 m Gefälle und 300 Umläufen pro Minute eine Leistung von 2700 P.S. abgibt.

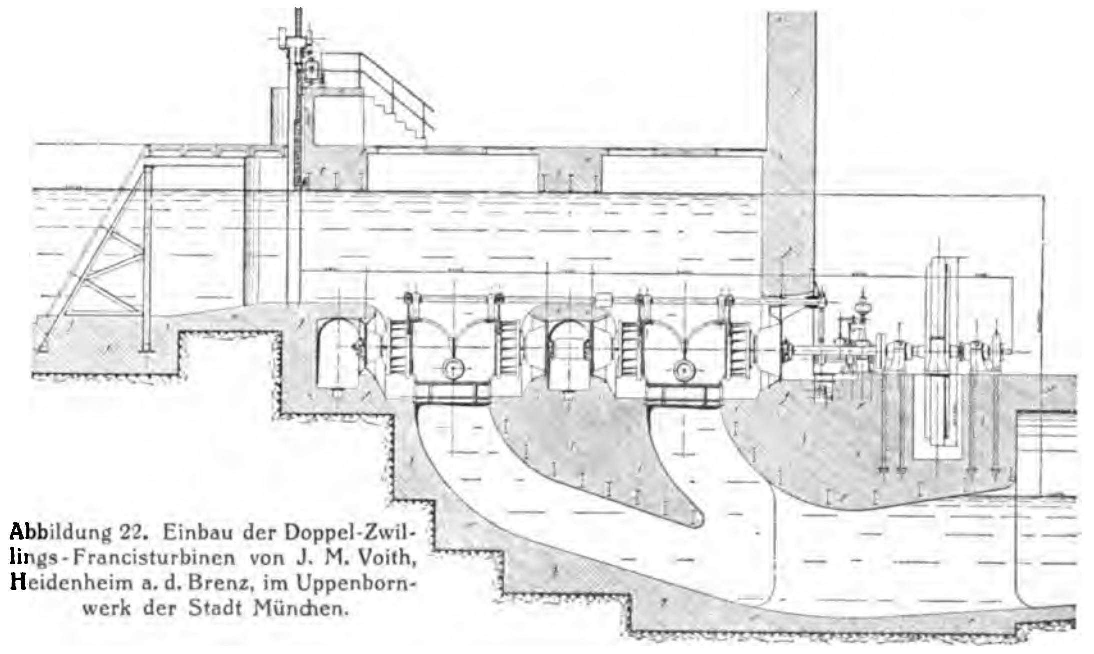


Abbildung 22. Einbau der Doppel-Zwillings-Francisturbinen von J. M. Voith, Heidenheim a. d. Brenz, im Uppenbornwerk der Stadt München.

Die Gesamtansicht eines Peltonrades samt Regulator und Druckregulierung ist in Abbildung 37 gegeben. Rechts steht der selbsttätige Regulator, in der Mitte am Gehäuse ist das Zufuhrrohr zur Düse. Auf der Welle sitzt ein schweres Schwungrad. Links aufgestellt ist die Druckregulierung, deren Zweck noch erläutert wird.



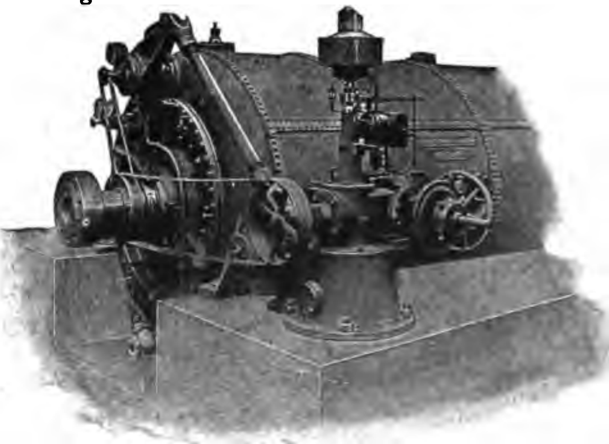
Abbildung 23. Doppel-Zwillings-Francisturbine. Gebaut von J. M. Voith, Heidenheim a. d. Brenz.

Ein Peltonrad, das, um mehr Wasser verarbeiten zu können, von zwei Düsen beaufschlagt wird, zeigt die Abbildung 38 von der Zentrale Gampel (Schweiz). Die Maschine leistet unter einem Gefälle von 220 m bei 375 Touren 3300 P. S. Beide Düsen werden gleichzeitig und in gleichem Maße vom Geschwindigkeitsregler verstellt. Mit dem Reguliergestänge ist die vor dem Regler sichtbare Druckregulierung verbunden. Zu den Düsen ist noch zu bemerken, daß die schon in der schematischen Abbildung 2 dargestellte Konstruktion, die Nadeldüse, sich immer mehr verbreitet. Die Nadel in der Mitte der Düse wird mehr oder weniger vorgeschoben und schließt dadurch die Düsenöffnung mehr oder weniger ab. Bei einer anderen Ausführungsform, bei der Zungendüse, hat eine drehbare Regulierzunge im rechteckigen Düsenkanal den Abschluß zu besorgen.



Abbild. 24. Doppel-Zwillings-Francisturbine. Gebaut von Briegleb, Hansen & Ko., Gotha, für das Elektrizitätswerk Tammerfors.

c) Hilfseinrichtungen. Peltonrad und Francisturbine sind durch die bisherigen Ausführungen ihrem konstruktiven Aufbau nach in der Hauptsache geschildert. Bleiben noch die Hilfseinrichtungen und vorerst als besonders wichtig die Regulatoren zu besprechen.



Abbild. 25. Francis-Frontalzwillingsturbine mit Geschwindigkeitsregler. Gebaut von J. M. Voith, Heidenheim a. d. Brenz.

Für fast alle modernen Antriebszwecke ist es nötig, daß die Kraftmaschine immer mit gleicher Drehzahl läuft, gleichgültig, ob die ganze Leistung oder nur ein Teil der Leistung abzugeben ist, d. h. ob die Maschine vollbelastet oder teilbelastet läuft. Um dies zu erreichen, ist die Düse des Peltonrades bzw. der Leitapparat der Francisturbine verstellbar, wie schon gezeigt, denn ohne Änderung der zufließenden Wassermenge würde die Turbine bei

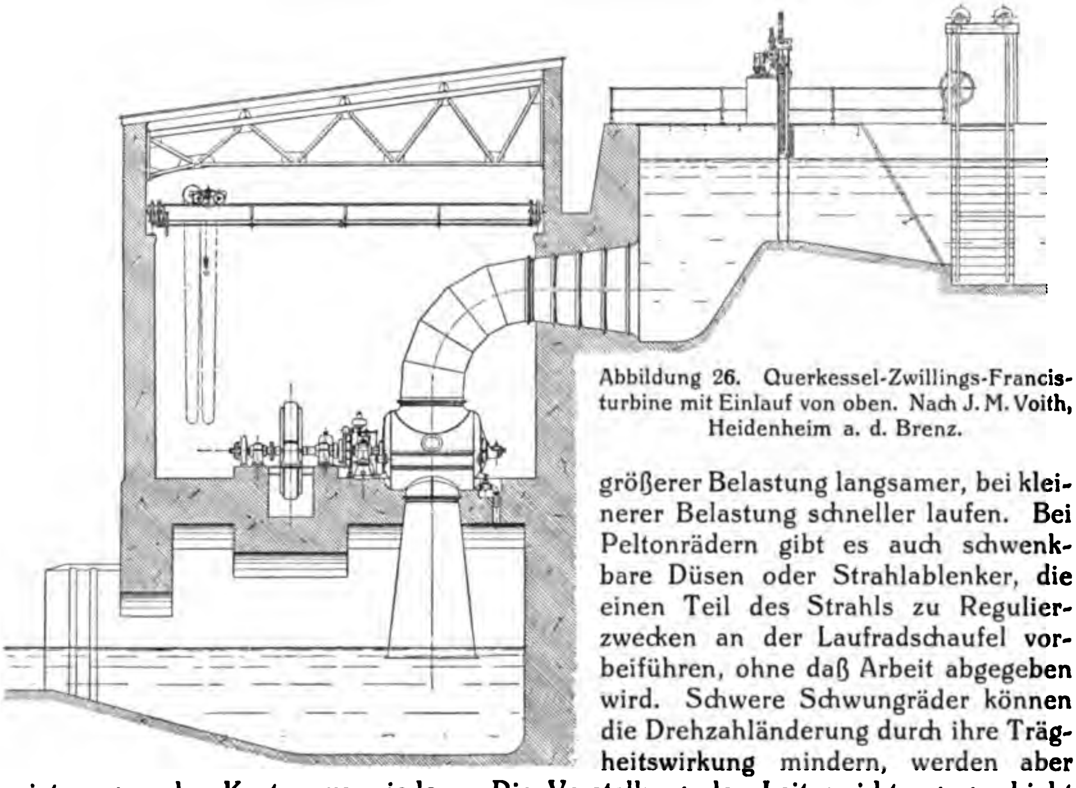


Abbildung 26. Querkessel-Zwillings-Francisturbine mit Einlauf von oben. Nach J. M. Voith, Heidenheim a. d. Brenz.

größerer Belastung langsamer, bei kleinerer Belastung schneller laufen. Bei Peltonrädern gibt es auch schwenkbare Düsen oder Strahlablenker, die einen Teil des Strahls zu Regulierzwecken an der Laufradschaufel vorbeiführen, ohne daß Arbeit abgegeben wird. Schwere Schwungräder können die Drehzahländerung durch ihre Trägheitswirkung mindern, werden aber meist wegen der Kosten vermieden. Die Verstellung der Leitvorrichtung geschieht natürlich am zweckentsprechendsten durch automatische Vorrichtungen. Eine solche Vorrichtung muß also durch jede Drehzahländerung der Maschine in Tätigkeit versetzt werden. Eine der einfachsten und längst bekannten Einrichtungen dieser Art ist durch Abbildung 39 schematisch dargestellt. Je schneller die Turbinenwelle, an deren Rotation die Schwungkugeln teilnehmen, umläuft, desto größer werden die radial nach außen wirkenden Fliehkräfte, wodurch die Kugeln und damit auch die Hülse H sich heben. Der nächstliegende Gedanke wäre nun, die Hülse durch irgendein Gestänge so mit dem verstellbaren Teil der Düse

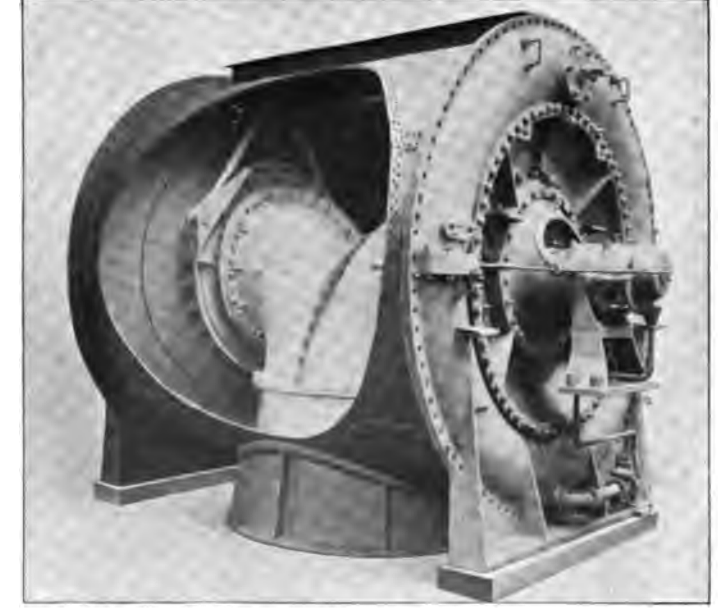


Abbildung 27. Querkessel-Zwillings-Francisturbine mit Einlauf von der Seite. Gebaut von J. M. Voith, Heidenheim a. d. Brenz.

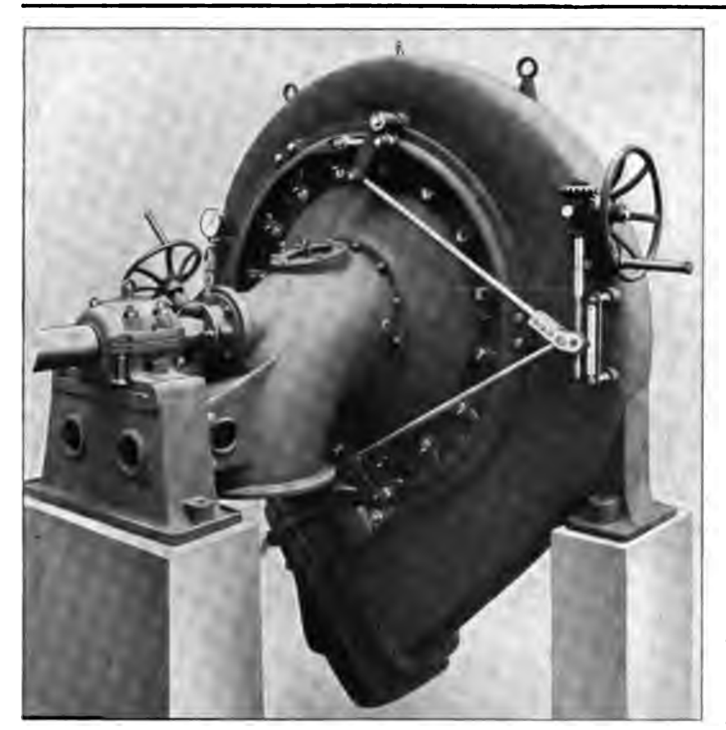


Abbildung 28. Francis-Spiralturbine mit Handregulierung und Absperrschieber. Gebaut von Briegleb, Hansen & Ko., Gotha.

oder des Leitrades in Verbindung zu bringen, daß die Leitvorrichtung durch die hochgehende Hülse geschlossen, durch die sinkende Hülse geöffnet wird. Diese direkte Verbindung der geschilderten Vorrichtung, des sog. Tachometers, mit der Leitvorrichtung, diese direkte Regulierung ist aber undurchführbar, weil die Kraft an der Hülse zur Bewegung der Leitvorrichtung nicht ausreichen würde. Man greift zur indirekten Regulierung, d. h. man benutzt die Bewegung der Hülse nur zur wenig Widerstand bietenden Steuerung des Servomotors, einer kräftigen Hilfseinrichtung, die erst die Verstellung der Leitvorrichtung bewirkt. Die Wirkungsweise der gesamten Vorrichtung, der automatischen Regulierung, sei nochmal kurz geschildert. Die Turbine läuft z. B. mit voller Belastung direkt mit einer Dynamomaschine gekuppelt. Im elektrischen Leitungsnetz wird plötzlich ein großer Teil der Belastung abgeschaltet, wie es durch Stillstehen eines elektrisch getriebenen Bahnzuges der Fall ist. Die Turbine fängt daher sofort an rascher zu laufen, weil die Dynamomaschine nicht mehr soviel Energie, wie die Turbine abgeben kann, verlangt. Dieses Rascherlaufen würde vielleicht der Turbine nicht viel schaden, wohl aber der Dynamo und den elektrischen Einrichtungen, weil die elektrische Spannung durch das Rascherlaufen sich unzulässig erhöht. Eine zu beträchtliche Steigerung der Drehzahl muß nun die automatische Regulierung verhindern. Sobald die Maschine anfängt, rascher zu laufen, heben sich durch die Fliehkraft die Kugeln des Tachometers, das von der Turbine angetrieben wird. Der Kraft-

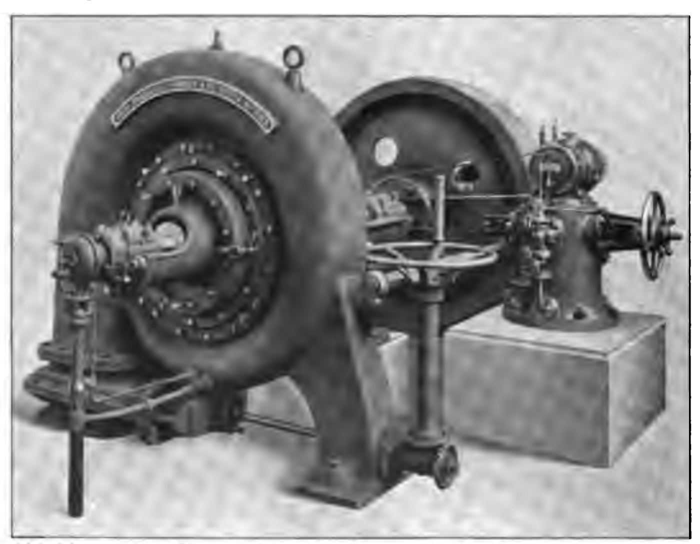


Abbildung 29. Francis-Spiralturbine mit Geschwindigkeitsregler und Absperrschieber. Gebaut von Briegleb, Hansen & Ko., Gotha.



Abbildung 30. Zwillings-Spiral-Francisturbine der Ontario Power Co., Niagara Falls. Zehn Stück gebaut von J. M. Voith, Heidenheim a. d. Brenz.

kolben (in Abbild. 39, links), der mit der Leitvorrichtung der Turbine verbunden ist, steht noch still, und die von den Kugeln verschobene Hülse bewegt den Steuerkolben (rechts) nach oben. Dadurch gibt der untere Teil des Steuerkolbens die Öffnung zur unteren Verbindungsleitung zwischen Steuer- und Kraftzylinder frei, so daß die rechts zugeführte Druckflüssigkeit auf die untere Seite des Kraftkolbens wirkt und ihn nach oben bewegt. Diese Bewegung, durch ein Gestänge übertragen, schließt die Leitvorrichtung der Turbine so weit, bis wieder Gleichgewicht zwischen zugeführter Energie und abgegebener Leistung herrscht. Durch die Hebelanordnung ist dafür gesorgt, daß entsprechend der Bewegung des Kraftkolbens und damit des Leitapparats auch der Steuerkolben verstellt wird und im Zeitpunkt des Eintritts von Gleichgewicht zwischen zugeführter und abgegebener Leistung auch wieder im Totpunkt, d. h. die Steuerkanäle überdeckend, steht. Dies ist notwendig, sonst würde die Turbine immer wieder ganz geschlossen oder ganz geöffnet und die Reguliervor-

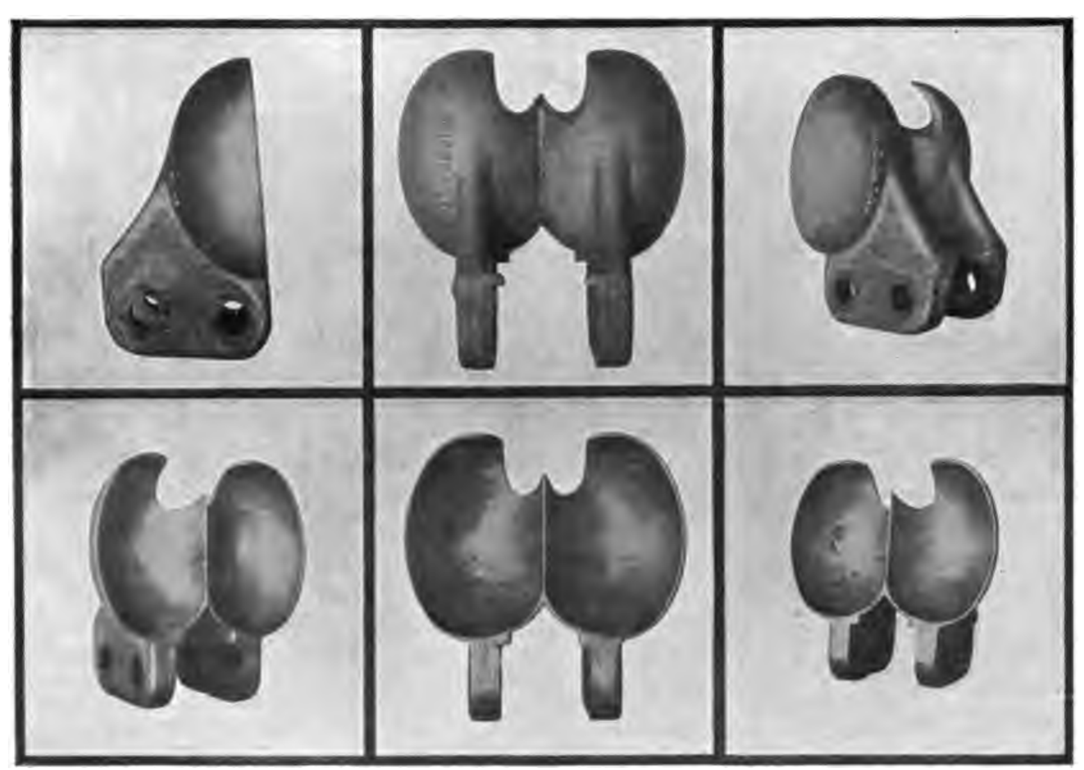


Abbildung 31. Ellipsoidische Doble-Schaufel der Abner-Doble-Company, San Francisco.

richtung nicht mehr zum Stillstand kommen. Bei stärkerer Belastung der Turbine tritt das entgegengesetzte Spiel ein. Abbild. 39 zeigt (nach Budau, Regulierung hydr. Motoren) nur die schematischen Grundzüge einer automatischen Regulierung. Die praktisch ausgeführten Vorrichtungen sind sehr kompliziert gebaut, weil mancherlei Hilfsorgane vorzusehen sind, um ein genaues und zuverlässiges Arbeiten zu sichern. Ein näheres Eingehen auf dieses weit ausgebaute, schwierige Spezialgebiet verbietet sich hier.* Die äußere Ausgestaltung von automatischen Regulatoren ist aus den Abbild. 37 (rechts) u. 25 (rechts) zu ersehen. Beide Typen arbeiten mit Öl als Druckflüssigkeit. Der Druck wird im Regulator selbst durch eine von der Turbinenwelle aus angetriebene Kapsel- (Zahnrad-) Pumpe erzeugt. Bei höheren Gefällen wird wohl auch das unter genügendem Druck stehende Wasser der Turbinenrohrleitung entnommen, bei nicht ganz klarem Wasser aber in Filtern gereinigt, um die empfindlichen Steuerorgane zu schonen.

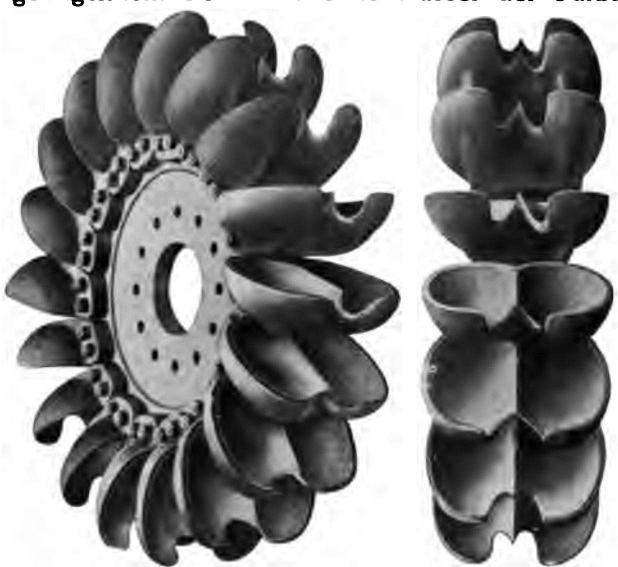


Abbildung 32. Laufrad der Abner-Doble-Company, San Francisco. Scheibe aus Nickelstahl, Schaufeln aus gehärtetem Stahlguß.

Noch eine bei Hochdruckanlagen mit Rohrleitung wichtige Hilfseinrichtung sei kurz erwähnt: die Druckregulierung. Das vorhin geschilderte Spiel der automatischen Regulierung würde, falls nicht wasserverschwendende Strahlablenker bei Peltonrädern verwendet sind, ohne Anbringung einer Druckregulierung Folgen haben, die für die Druckleitung wie für die Regulierung gefährlich sind. Wird die Turbine entlastet, so schließt der automatische Regulator den Leitapparat der Turbine. Die in der Rohrleitung in Bewegung befindliche Wassersäule wird also mit einem Ruck aufgehalten, was eine ganz bedeutende Drucksteigerung im Rohr ergibt, die dem Rohr gefährlich werden kann. Diese Drucksteigerung hat aber die weitere Folge, daß nun durch den Leitapparat, obwohl er zum Teil geschlossen wurde, mehr Wasser hindurchgeht, als dem Belastungszustand der Turbine entspricht. Die Maschine fängt daher noch einmal an, rascher als normal zu laufen, die Regulierung tritt noch einmal in Tätigkeit, und dadurch wird überreguliert, d. h. der Leitapparat so weit geschlossen, daß nach dem Ausklingen der Druckschwankungen in der Rohrleitung nunmehr der Turbine zuwenig Wasser zufließt. Die Maschine läuft dann zu langsam, und der Reguliervorgang beginnt noch einmal im entgegengesetzten Sinne. Diese Mißstände werden sehr gemildert durch Anbringung einer Druckregulierung, die mit dem Leitapparat gekuppelt ist. Die Druckregulierung ist so eingerichtet, daß das Ventil einer an die Rohrleitung angeschlossenen Abflußleitung im selben Maße geöffnet wird, wie der Leitapparat der Turbine sich schließt, so daß, augenblicklich wenigstens, die in der

* Als Literatur ist außer den Gesamtwerken über Wasserturbinen hier noch zu nennen: Budau, „Beiträge zur Frage der Regulierung hydraulischer Motoren", und Bauersfeld, „Die automatische Regelung der Turbinen".

Rohrleitung sich bewegende Wassersäule nicht beeinflußt wird, also keine Drucksteigerung auftreten kann. Um Wasser zu sparen, sind Vorkehrungen getroffen, daß das Ventil sich allmählich schließt, ohne eine merkbare Drucksteigerung in der Rohrleitung hervorzurufen. Im äußeren Aufbau ist eine Druckregulierung in Abbildung 37 (links) und in Abbildung 38 (rechts) zu sehen. Die schräge Stange verbindet mit dem Leitapparat.



Abbildung 33. Laufrad einer Freilaufturbine. Gebaut von Briegleb, Hansen & Ko., Gotha.

d) Wahl der Turbine. All die geschilderten, so verschieden gestalteten konstruktiven Bauarten der Wasserkraftmaschinen haben sich durch die Anpassung an die immer wieder anders gearteten örtlichen Verhältnisse und Betriebsbedingungen herausgebildet. Ganz abgesehen vom äußeren Ausbau der Wasserkraft, der Gefälle, Wassermenge und Art der Wasserzuführung bestimmt, wird auch bei der Festlegung des Turbinensystems, der konstruktiven Ausführung, der Maschinenzahl, der Drehzahl, der Einbauverhältnisse ein einheitliches Zusammenarbeiten von Bauingenieur, Maschineningenieur und Elektroingenieur nötig sein. Natürlich dürfen schon bei der Aufstellung dieses technischen Entwurfs wirtschaftliche Gesichtspunkte, wie sie im Abschnitt 3 besprochen werden, nicht übersehen werden. Die Projektierung einer hydroelektrischen Zentrale ist daher nur auf Grund eindringendster Fachkenntnisse und umsichtiger Beurteilung der besonderen Bedingungen des Einzelfalles vorzunehmen. Deswegen können auch die hier nur allgemein zu haltenden Bemerkungen ziemlich kurz ausfallen.



Abbildung 34. Doble-Rad mit Regulierdüse. Gebaut von der Abner-Doble-Company, San Francisco.

Wenn Gefälle, Wassermenge, Maschinenzahl und Drehzahl festliegen, ist die Wahl des Turbinensystems mit Hilfe einer aus Gefälle, Leistung und Drehzahl errechen-

baren Kennziffer, der „charakteristischen Drehzahl",* in der Regel schnell erledigt. Die gleiche Kennziffer, deren Wert für Projektierung und Konstruktion von Prof. Dr. Camerer, München schon vor Jahren nachdrücklich hervorgehoben wurde, gibt dem Turbineningenieur auch zugleich noch Grenzen an für die Wahl der Düsenzahl bei Peltonrädern bzw. Laufräderzahl pro Maschine bei Francisturbinen.

Die große Einfachheit des Peltonrades mit einer Düse und einem Laufrad muß dann aufgegeben werden, wenn eine verhältnismäßig große Wassermenge zu verarbeiten ist und die Drehzahl nicht sehr niedrig gehalten werden darf. Es ist dann die teurere Ausführung zweier Räder auf der Welle mit je einer oder mehreren Düsen oder eines Rades mit mehreren Düsen möglich.

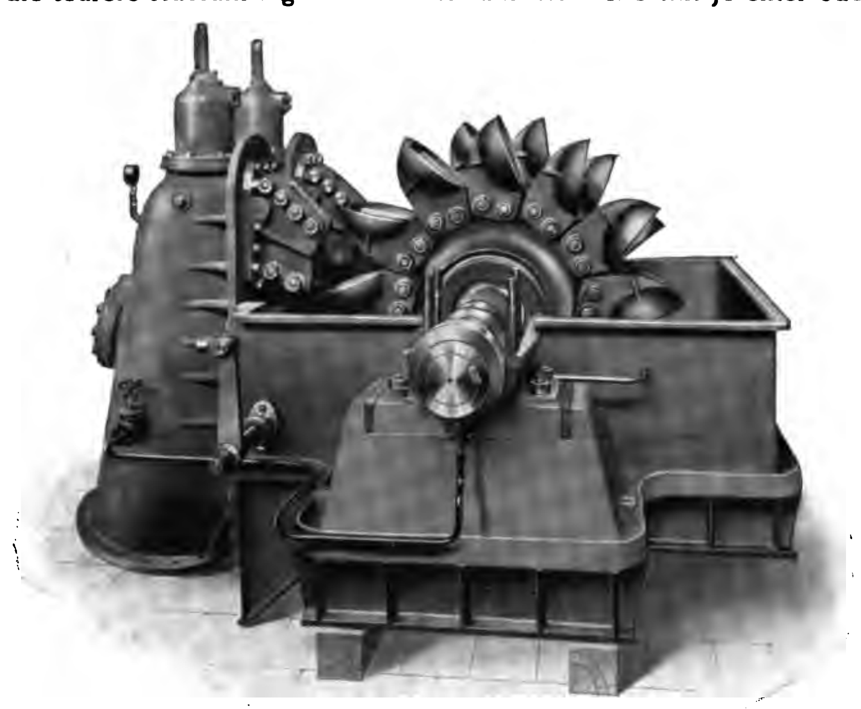


Abbildung 35. Pelton-Doppelturbine. Gebaut von der Maschinen- und Armaturenfabrik vorm. H. Breuer & Ko., Höchst a. M.

Die Rücksicht auf guten Wirkungsgrad führt bei der Francisturbine zur Anordnung mehrerer Laufräder pro Maschine, wenn bei großer Drehzahl und kleinem Gefälle große Wassermengen zu verarbeiten sind.

Es zeigt sich nämlich, daß die Francisturbinen mit der charakteristischen Drehzahl zwischen 90 bis 200 bessere Wirkungsgrade haben als solche mit größerer und kleinerer Kennziffer. Und zwar ist der Wirkungsgrad solcher sog. Normalläufer nicht nur bei der in der Konstruktion angenommenen Wassermenge höher als bei Langsam- und Schnelläufern, sondern auch bei Verkleinerung der Wassermenge im Betriebe, bei Teilbeaufschlagung, bleiben die Wirkungsgrade besser, die ganze Wirkungsgradkurve (wie eine solche in Abbildung 6 bereits gezeigt) liegt höher. In Wasserkraftanlagen mit stark wechselnder Wassermenge und kleiner Maschinenzahl ist das von besonderer Wichtigkeit. Bei größerer Maschinenzahl wird das Abstellen einer Anzahl der Maschinen es erlauben, trotz verkleinerter Wassermenge die noch im Betrieb stehenden Einheiten möglichst mit der normalen Wassermenge

* Die hier nicht abzuleitende Formel für die charakteristische Drehzahl lautet:

$$n_s = \frac{n}{\sqrt{H}} \cdot \sqrt{\frac{N}{H \cdot \sqrt{H}}}$$

n = Drehzahl bei H_m Gefälle,
N = Leistung in P. S. bei H_m Gefälle.



Abbildung 36. Laufräder einer Pelton-Doppelturbine. Gebaut von der Maschinen- und Armaturenfabrik vorm. H. Breuer & Ko., Höchst a. M.

zu betreiben. Endlich zeigen sich Normalläufer gegenüber bei ev. Gefälleänderung nötig werdender Änderung der Drehzahl im Wirkungsgrad unempfindlicher. Wie aus

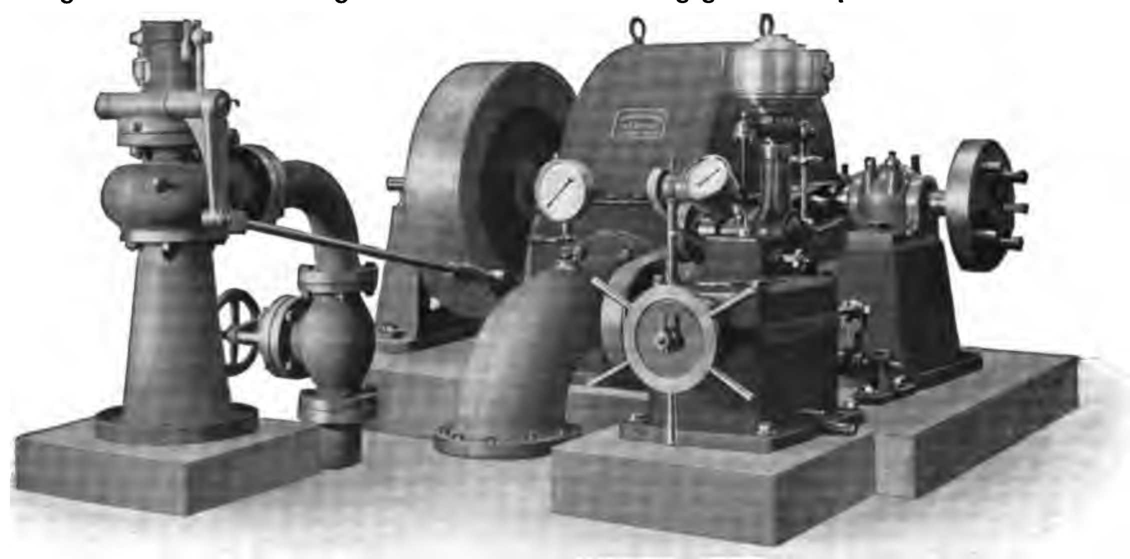
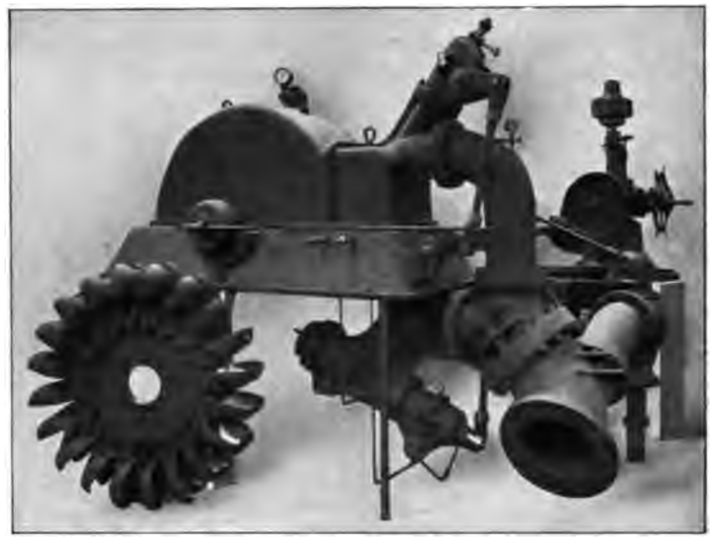


Abbildung 37. Peltonturbine mit selbsttätigem Geschwindigkeits- und Druckregler. Gebaut von der Maschinen- und Armaturenfabrik vorm. H. Breuer & Ko., Höchst a. M.

der Formel S. 234 ersichtlich, erreicht man bei großer Leistung, vorgeschriebenem Gefälle und fester Drehzahl normale charakteristische Drehzahl durch Verkleinerung der



Abbild. 38. Peltonrad mit zwei Nadeldüsen und Geschwindigkeits- und Druckregler. Gebaut von J. M. Voith, Heidenheim a. d. Brenz.

Leistung pro Laufrad, d. h. Anordnung mehrerer Laufräder. Der geringere Wirkungsgrad in dem selteneren Falle zu kleiner charakteristischer Drehzahl wird in der Regel durch äußerst sorgfältige Laufradkonstruktion möglichst vermieden.

Die Gesichtspunkte, die den Fachmann bei der Auswahl von Turbinensystem und -bauart leiten, sind damit kurz berührt. Der Turbineningenieur, dem die Wahl der Turbine obliegt, hat dann auch gewisse Garantien für die Wasserkraftmaschine zu leisten. In erster Linie natürlich für gute Konstruktion und einwandfreie Betriebsfähigkeit. Bei Elektrizitätswerken ist mit Rücksicht auf geringe Spannungsschwankungen im elektrischen Netz zumeist eine höchste und geringste momentane Drehzahl vorgeschrieben, die bei augenblicklichen Belastungsänderungen nicht über- bzw. unterschritten werden darf. Ferner sind aus dem gleichen Grunde zumeist für die dauernd eintretende Drehzahländerung bei dauernden Belastungsänderungen Grenzen ausbedungen. Die Möglichkeit, diese genannten Bedingungen innezuhalten, hängt ab von der Konstruktion des selbsttätigen Regulators, von den im Maschinenaggregat enthaltenen Schwungmassen, ev. eigens angeordneten Schwungrädern und bei Wasserzuführung durch eine Rohrleitung besonders auch von passenden, rechnerisch ziemlich schwierig festzulegenden Beziehungen zwischen Gefälle, Rohrleitungslänge, Schnelligkeit der Regulierbewegung usw. Gerade diese gegenseitige Beeinflussung der Wasserströmung in der Rohrleitung und des Reguliervorganges hat in manchen älteren Anlagen große Betriebsschwierigkeiten verursacht.

Abbildung 39.

Strenge Garantien werden weiterhin in bezug auf den Wirkungsgrad, insbesondere bei verkleinerter Beaufschlagung, ev. auch bei geänderter Drehzahl gefordert. Die Reibungs- und besonders die Wirbelverluste von Wasserströmungen in Laufrädern sind bisher

für neu zu konstruierende Schaufelkanäle nur durch Vergleich mit bereits ausgeführten und untersuchten Rädern abschätzbar. Exakt rechnerisch vorausbestimmen lassen sie sich ohne diese Erfahrungen nicht. Eine zuverlässige Garantie kann also die Turbinenfabrik nur dann bieten, wenn die in der Maschine eingebauten Laufräder bereits auf ihren Wirkungsgrad hin untersucht wurden. Bei kleineren Wasserkraftanlagen mag immerhin eine weniger strenge Garantie genügen, bei größeren aber, bei denen die Kosten der Wasserkraftmaschine ohnehin nur einen kleinen Prozentsatz der hohen Gesamtkosten und die wegen der teuren Wasserbauten auf langsame Tilgung angewiesen sind, muß eine verläßliche Garantie für hohen Wirkungsgrad bei allen Betriebsbedingungen gefordert werden. Diese Garantie wird am besten geboten durch

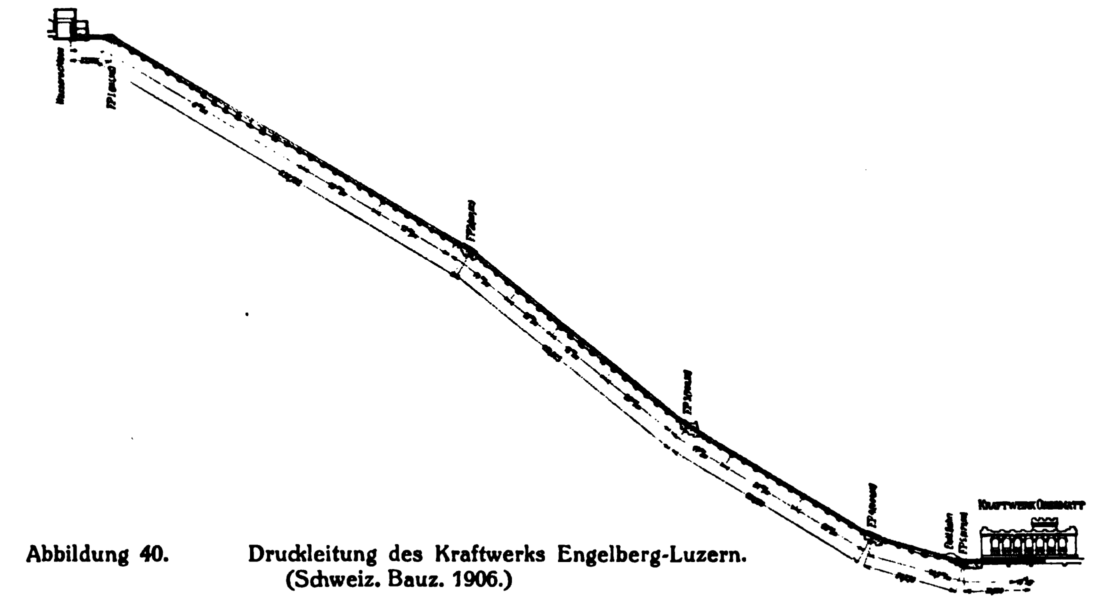


Abbildung 40. Druckleitung des Kraftwerks Engelberg-Luzern. (Schweiz. Bauz. 1906.)

Vorlage von Bremsprotokollen über Bremsungen an einem gleich großen oder geometrisch ähnlichen Laufrad, wie es das eingebaute ist.

Einige Worte über die Bremsungen. Durch eine Bremsung soll der Wirkungsgrad einer Turbine festgestellt werden. Man mißt also das vorhandene Gefälle (durch Nivellement, bei sehr großen Gefällen durch Manometer), die von der Turbine verarbeitete Wassermenge (mittels hydrometischer Flügel oder mit Schirm, ev. auch durch Überfall) und die Drehzahl und Leistung der Turbine (mechanisch mit Bremszaum, elektrisch bei Antrieb von Dynamomaschinen). Gefälle und Wassermenge messen die der Turbine zur Verfügung gestellte hydraulische Leistung, die in die abgegebene Leistung dividiert den Wirkungsgrad ergibt. Häufig werden solche Bremsungen nach Fertigstellung einer Anlage zur Kontrolle, ob die Garantien erfüllt sind, vorgenommen, können aber wegen der Umständlichkeit und Kostspieligkeit sich dann zumeist nur auf Stichproben erstrecken. Dagegen hat eine vorwärtsstrebende Turbinenfabrik selbst das größte Interesse daran, möglichst viele und umfassende Bremsungen ihrer Laufräder vorzunehmen, um Sicherheit für die einzuhaltenden Garantien zu gewinnen und um den Wirkungsgrad ihrer Laufräder immer noch weiter zu verbessern. In solchem Umfang können aber Bremsungen nicht in ausgeführten Anlagen vorgenommen werden, sondern nur in eigens zu diesen Untersuchungen ein-

gerichteten Versuchsanstalten, wie sie sich erstklassige Fabriken mit bedeutenden Kosten erbaut haben. Sollten die vorgelegten Bremsprotokolle sich auf ein ähnlich verkleinertes Versuchslaufrad beziehen, so ist bei der größeren Ausführung nur ein noch günstigerer Wirkungsgrad zu erwarten. Solche umfangreichen Bremsprotokolle aus Versuchsanstalten bieten weiterhin den Vorteil, aus Laufrädern mit gleich hohem größtem Wirkungsgrad dasjenige heraussuchen zu können, das den im Einzelfalle vorhandenen Betriebsverhältnissen (Wassermengenänderung, Gefälleschwankung) am besten entspricht. Es gibt Fälle, bei denen durch die gewählte Turbinenkonstruktion die Ausmaße der Beton-Wasserkammern festgelegt werden und damit, auch falls nachher die Bremsung ein schlechtes Ergebnis haben sollte, ein Einbau eines besseren Laufrades fast unmöglich wird und so jahrzehntelang Energie nutzlos und ertraglos vergeudet wird.

Abbildung 41. Druck- und Verteilleitungen des Kraftwerks Engelberg-Luzern. (Schweiz. Bauz. 1906.)

e) Gesamtanlagen. Bisher wurde nur das Herz der ganzen Wasserkraftanlage, die Wasserkraftmaschine, betrachtet. Einige Bilder brachten bereits Einblicke in die Anordnung der Maschinen im Krafthause und den Wasser-Zu- und Abfluß zu den Turbinen. Des allgemeinen Überblicks wegen ist es nötig, noch kurz das große Gebiet der Wasserfassung und -zuleitung von hydroelektrischen Zentralen zu besprechen. Es ist so umfangreich, daß auf Einzelheiten gar nicht eingegangen werden kann.

Es handelt sich also darum, die „rohe Wasserkraft" auszubauen, der Wasserkraftmaschine eine bestimmte Wassermenge unter einem bestimmten Gefälle zuzuführen. Damit ergibt sich die Notwendigkeit, durch ein Stauwerk das Wasser anzusammeln, um es aus dem See oder Fluß entnehmen zu können. Kanäle oder Rohrleitungen führen das gefaßte Wasser den Turbinen im Krafthause zu, ein Unterwassergraben gibt das Wasser nach der Energieentnahme wieder an den Fluß zurück. Die Stauwerke sind je nach den örtlichen Verhältnissen als Wehre oder Talsperren mit Stauweihern ausgeführt.

Teils zur Erleichterung der Entnahme des Triebwassers, teils zur Erhöhung des Nutzgefälles werden in fließende Gewässer Wehre eingebaut; bewegliche Wehre dann, wenn die Abführung des Hochwassers dies nötig macht, sonst feste Wehre. Wenn

nicht schon die Rücksicht auf Schiffahrt oder Flößerei (Floßgasse) es erfordert, so wird doch meist ein Teil des festen Wehrs als bewegliches ausgebildet sein als

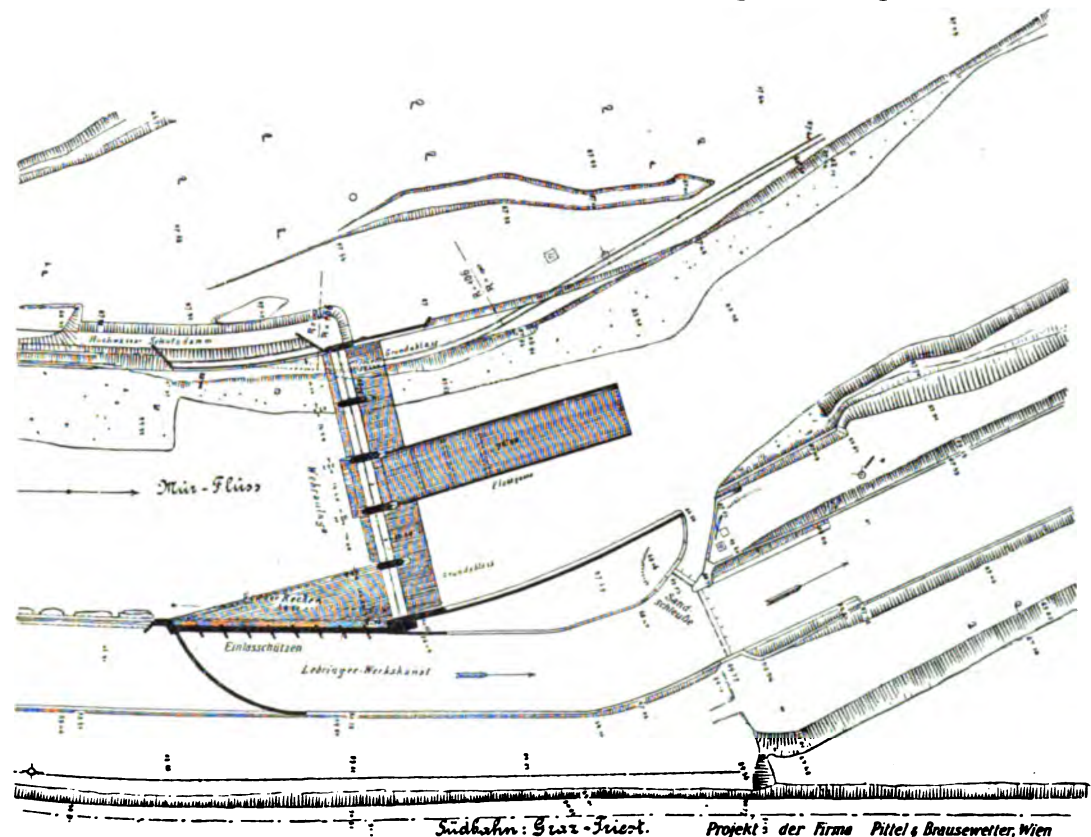


Abbildung 42. Projekt zum Einbau einer Wehranlage für das Elektrizitätswerk in Lebring bei Graz. Projekt von Pittel & Brausewetter, Wien.

Ablaß zur Beseitigung der Ablagerungen vor dem Wehr; oder es sind Eisschützen angeordnet, um ein Anstauen von Eis zu vermeiden. Die beweglichen Wehre bestehen zumeist aus hölzernen Schützen, bei größeren Ausführungen werden eiserne Schützen vorgezogen. Walzenwehre, bestehend aus einem langen zylindrischen Blechrohr, das, gehoben, die ganze Wehrbreite freigibt, wurden in neuerer Zeit öfters mit Erfolg eingebaut. Feste Wehre aus Holz können als Seltenheit gelten, die normale Ausführung ist aus Stein oder Beton. Da die Ausdrücke Grundwehr und Überfallwehr häufig gebraucht werden, mag erwähnt sein, daß beim Überfallwehr der Unterwasserspiegel unter der Krone des Wehrs bleibt. Die bauliche und konstruktive Ausführung der Wehre, insbesondere auch die verschiedenartigen Aufzugsvorrichtungen der Schützen müssen und können hier unbesprochen bleiben.

Talsperren sind Stauwerke, die durch Bildung eines künstlichen Sees oder Vergrößerung eines natürlichen die zufließende Wassermenge von Gewässern aufspeichern und es dadurch ermöglichen, trotz wechselnder Wasserführung der Zuflüsse, längere Zeit hindurch eine konstante Wassermenge zur Verfügung zu haben. Zugleich schaffen sie vergrößertes Gefälle. Die Ausgiebigkeit der Aufspeicherung hängt natürlich einmal ab von der Größe des gebildeten Stauweihers, dann aber von der Höhen-

lage des Staubeckens über dem Krafthause, weil bei größerem Gefälle eine kleinere Wassermenge für gleiche Leistung genügt. Selbstverständlich besitzt auch eine Talsperre Überläufe, die das zeitweise überschüssige Wasser abführen.

Das durch das Stauwerk gefaßte Wasser führen Kanäle oder Rohrleitungen dem Kraftwerk zu.

Bei hohen Gefällen, in Gebirgsgegenden, schließt sich an das Stauwerk hinter einer Einlaßschütze meist ein Stollen (Tunnel) an, der mit geringem Gefälle nur zur Durchquerung eines Bergabhangs dient und dann in ein sog. Wasserschloß mündet. Das Wasserschloß hat den Zweck, den Übergang des Stollens zur Rohrleitung zu vermitteln, enthält nochmals Schütze und Rechen und kann als kleiner Ausgleich für augenblickliche Schwankungen beim Regulieren dienen.

Die Druckrohrleitung führt das Wasser den Turbinen zu. Als Material wird selten Gußeisen, zumeist Schmiedeeisen oder Stahl gewählt. In neuerer Zeit versucht man mit Erfolg armierten Beton. Die Besprechung der Verflanschung und Vernietung, ferner der Verankerung der Rohre in Fixpunkten usw. würde wieder zu weit führen. Die Wärmedehnungen bei Sonnenbestrahlung machen die Einfügung von Stopfbüchsen oder federnden Zwischenstücken nötig. Der Abschluß von Rohrleitungen geschieht zumeist durch Wasserschieber, bei größeren Durchmessern durch sog. Drosselklappen. An Scheitelpunkten der Leitung sind Entlüftungsvorrichtungen anzubringen. Jede Rohrleitung muß natürlich entleert werden können, wobei es nötig ist, für die Möglichkeit des Luftzutritts zu sorgen. Drucksteigerungen in Rohrleitungen beim Regulieren der Turbinen ohne Druckregulierung machen die Anbringung von Sicherheitsventilen nötig. Doch verschlechtern alle solche Vorrichtungen zur Aufnahme der Druckschwankungen, wie z. B. Standrohre, Windkessel, den Reguliervorgang so sehr, daß heute in der Regel eine Druckregulierung vorgesehen wird. Im Wasserschloß ordnet man gern eine Sicherheitsschlußvorrichtung an, die dann das Rohr abschließt, wenn z. B. bei Rohrbruch die Wassergeschwindigkeit im Rohr eine gewisse Grenze überschreitet. Damit werden die großen Verheerungen verhütet, die einige Rohrbrüche im Gefolge hatten. Bei der Einmündung der Rohrleitung in das Turbinengehäuse befindet sich meist nochmals ein Schieber oder eine Drosselklappe zum Abschluß.

Eine schematische Zeichnung der Druckrohrleitung des Kraftwerks Engelberg-Luzern in Oberwatt gibt Abbildung 40 (der „Schweizerischen Bauzeitung" 1906, Bd. XLVIII entnommen). In das Wasserschloß links oben mündet der Stollen vom Sammelweiher her ein. Abbildung 41 (a. a. O.) zeigt die Einmündung der Druckleitungen in das Kraftwerk. Die Abschluß- und Entleerungsvorrichtungen liegen hier außerhalb des Krafthauses, werden aber von innen bedient.

Bei kleineren Gefällen übernimmt ein Kanal die Zuführung des Wassers vom Stauwerk bis zum Turbinenhaus. Der Einlauf des Kanals ist durch Einlaßschützen absperrbar und durch einen Grobrechen gegen große Fremdkörper gesichert. Ein Überlauf erlaubt überschüssiges Wasser wieder in den Fluß abzulassen. Eine Sandschleuse hat den Zweck, Geschiebe und Sand, die trotz des Grundablasses im Wehr noch in den Kanal kommen, wieder zu entfernen. Vor dem Turbinenhause erweitert sich der Kanal, ein Feinrechen hält nochmals Fremdkörper zurück. Meist ist auch hier noch ein Überlauf und eine Eisschütze angeordnet, ebenso ein Leerschuß, um jederzeit sämtliches Wasser unter Umgehung der Turbinen abführen zu können. Bei ziemlich völliger Ausnutzung der ganzen Wassermenge des Flusses muß der Kanal ev. auch noch der Schiffahrt oder Flößerei dienen und müssen dann die entsprechenden Vorkehrungen getroffen werden. Hinter dem Feinrechen liegen die Einlaßschützen

zu den Turbinenkammern. Die Turbinenkammern liegen bei horizontaler Turbinenwelle wohl gelegentlich vor dem Krafthause, um an Hochbau zu sparen. Der Unter-

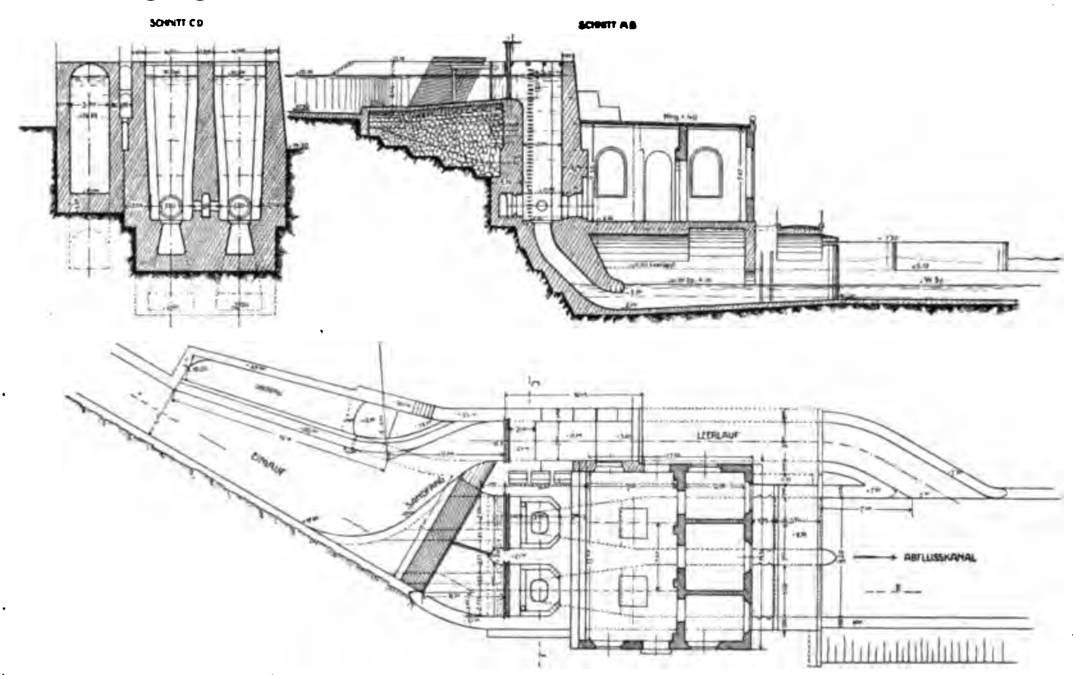


Abbildung 43. Turbinenanlage der Zementfabrik „Spalato", Salona (Dalmatien). Gebaut von Pittel & Brausewetter, Wien.

wasserkanal endlich führt die Wassermenge wieder dem Fluß zurück. Natürlich will man durch die Zuleitung möglichst wenig Gefälle verlieren. Kleines Kanalgefälle hat aber besonders bei rauhen Böschungen kleine Wassergeschwindigkeit zur Folge, welche wieder großen Kanalquerschnitt, teure Aushubarbeit verlangt.

Als Beispiel einer Wasserfassung mit beweglichem Wehr und anschließendem Kanaleinlauf ist in Abbildung 42 ein von der Betonbaufirma Pittel & Brausewetter (Wien) aufgestelltes Projekt gegeben. Die Anordnung der Wasserbauten und der Turbinenkammern vor einem Krafthause für zwei Turbinen zeigt Abbildung 43, nach welchem Plan die Firma Pittel & Brausewetter (Wien) die Anlage gebaut hat.

An Hand dieser kurzen Ausführungen wird es keine Schwierigkeiten bieten, sich in Plänen von Wasserkraftanlagen über die Grundzüge der ganzen Anordnung zu orientieren. Eine Beschreibung einzelner ganzer Anlagen nähme hier zu viel Raum ein. Es kann auf die „Schweizer Bauzeitung", die „Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen" und die „Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure" verwiesen werden, die in den letzten Jahrgängen eine Reihe von hochinteressanten modernen hydroelektrischen Zentralen in ausführlicher Weise und mit reichem Bildmaterial geschildert haben.

2. WINDKRAFT

Bei einer Darstellung der „Technik im 20. Jahrhundert" kann die Rücksicht auf die volkswirtschaftliche Bedeutung der behandelten Gebiete nicht außer acht gelassen werden. Größerer wirtschaftlicher Einfluß kommt den Windkraftmaschinen nicht zu. Ist zwar die Anzahl von etwa 16000 Windkraftmaschinen gegen 45000 Wasserkraftmaschinen in Deutschland

(im Jahre 1895) immerhin beachtenswert, so dürfte sich doch das Verhältnis ganz bedeutend verschieben, wenn man die von Wind- und Wasserkraftmaschinen geleisteten Pferdekräfte vergleicht. Eine allerdings wenig sichere Schätzung könne etwa 30000 Windkraftpferde (1895) einer Anzahl von 294400 Wasserkraftpferden (1905) in Deutschland gegenüberstellen. Diese Zahlen rechtfertigen nur eine ganz kurze Behandlung der Windkraftmaschinen.

Die Berechnung und Konstruktion der Windkraftmaschinen geschieht sehr empirisch. Eine zuverlässige Theorie ist dafür noch nicht aufgestellt und dürfte manche Schwierigkeiten bereiten. Über die Konstruktion ist nur kurz zu sagen, daß selbsttätige Einstellung der Radaxe nach der Windrichtung erforderlich ist. Selbsttätige Regelung durch Verkleinerung der Flügelfläche bei gefährlich werdender Windstärke kann empfehlenswert sein, wenn die konstruktive Ausführung Gewinn an Leistung bei normaler Windstärke oder größere Betriebssicherheit verspricht.

Die Wahl der Maschinengröße und damit der Maschinenstärke verlangt Beachtung von Verwendungszweck und Übersicht über die Windstärke im Verlaufe des Jahres. Ein günstiges Anwendungsgebiet sind Pumpwerke für Be- und Entwässerungsanlagen und Wasserversorgung, weil dabei die Anlage eines entsprechend großen Behälters am einfachsten bis zu einem gewissen Grade unabhängig von wechselnder Windstärke machen kann. Unter günstigen Verhältnissen können auch untergeordnete Kraftbedarfe in der Landwirtschaft für Dreschmaschinen, Häckselmaschinen, Schrotmühlen und Wasserpumpen und vielleicht noch in kleineren gewerblichen Betrieben durch Windkraft gedeckt werden. Die Beleuchtung einzelner Häuser kann bei entsprechender Windhäufigkeit unter Benutzung von Akkumulatorenbatterien möglich sein. Für andere Verwendungen wird die Betriebsbereitschaft zumeist zu unsicher gelten müssen. Am ungünstigsten für die Verwendung von Windkraftmaschinen liegen die Verhältnisse immer dann, wenn eine gleichwohl kleine Leistung sehr stetig verlangt wird ohne besondere Akkumulierungsmöglichkeit. Dieser Fall verlangt große teure Maschinen, die auch bei geringer Windstärke die benötigte Leistung ergeben.

Mit diesen kurzen Bemerkungen kann die Ausnutzung der Windkraft ihrer wirtschaftlichen Bedeutung nach als genügend ausführlich geschildert angesehen werden.

3. WIRTSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN DER WASSERKRAFTAUSNUTZUNG*

GRUNDSÄTZE. Die Darlegungen in Abschnitt I haben uns gezeigt, wie die Ausnutzung einer Wasserkraft technisch durchgeführt wird. Die Frage, ob überhaupt der Ausbau einer Wasserkraft technisch möglich ist oder nicht, spielt fast nie eine Rolle. Es sind Gefälle von 0,5 m bis 1000 m in betriebssicheren Anlagen zur Ausnutzung gebracht. Bis zu den Grenzen der rein technischen Möglichkeit zu gehen, verbietet sich aus wirtschaftlichen Rücksichten. Allerdings stehen diese wirtschaftlichen Überlegungen meist in engem Zusammenhang mit den technischen, weil die technische Ausführung, die technischen Schwierigkeiten die Höhe der Bausumme bestimmen.

Wenn irgendwo Bedarf an größeren Energiemengen, heutzutage zumeist in Form von elektrischer Energie, entsteht, so ist die Frage, welche von der Natur gegebenen Energieträger, ob Wind, Wasser, Kohle oder Öl ausgenutzt werden sollen. Die dem Laien nächstliegende Antwort ist: Wenn irgend möglich, Wind oder Wasser, weil diese

* Literatur: Koehn, „Ausbau von Wasserkräften"; Mattern, „Die Ausnutzung der Wasserkräfte".

Energieträger „kostenlos" geboten werden. Leider fällt die verantwortliche, durch gründliche Sachkenntnis und eingehendes Studium des jeweilig vorliegenden Sonderfalles vorbereitete Entscheidung weniger leicht. Warum? Daß die Windkraft für Gewinnung größerer, stetig verlangter Energiemengen nicht genügen kann, ergab sich aus den Betrachtungen in Abschnitt 2.

Die Vor- und Nachteile der technischen Energiegewinnung aus Kohle und Öl sind bereits früher besprochen, ebenso die wirtschaftlichen Folgerungen, die wohl im Auge zu behalten sind bei den hier übrigbleibenden Ausführungen über die Wirtschaftlichkeit von Wasserkraftanlagen. Der Einfluß hygienischer und ästhetischer Rücksichten oder solcher auf Feuersicherheit ist bei der Wahl der auszunutzenden Energieträger kaum von entscheidender Bedeutung. Der Preis, die Billigkeit entscheidet: jener Energieträger wird gewählt, aus dem die benötigte Energiemenge mit den geringsten Kosten gewonnen werden kann.

Die Kosten der benötigten Energiemenge setzen sich aus den direkten und den indirekten Betriebskosten zusammen. Die direkten Betriebskosten sind jene, die unmittelbar vom Betriebe abhängen, die also in ihrem Gesamtbetrag größer sind bei stärkerer Inanspruchnahme des Werkes. Es sind das die Ausgaben für Schmier- und Putzmaterial, für die Bedienung, für die vom Betriebe abhängigen Reparaturkosten. Die indirekten Betriebskosten entstehen durch Verzinsung und Tilgung des Anlagekapitals, durch Rücklagen oder Ausgaben für die vom Betriebe unabhängigen Erneuerungen, durch Gehälter, Abgaben usw. Sie sind unabhängig von der Inanspruchnahme des Werkes.

Die Summe aus den direkten und indirekten Betriebskosten muß möglichst klein sein. Es nutzt also nichts, wenn zwar die direkten Betriebskosten bei einem Wasserkraftwerk klein sind, weil die Ausgaben für die Kohlen fehlen, aber gleichzeitig die indirekten Betriebskosten sehr hoch sind, weil vielleicht die Wasserbauten sehr umfangreich und schwierig waren.

AUFSTELLUNG DER ENTWÜRFE. Von vornherein läßt sich also schwer sagen, ob in einem bestimmten Einzelfalle zur Deckung eines größeren Kraftbedarfs eine mehr oder minder entfernte Wasserkraft ausgenutzt werden soll oder besser Kohle oder Öl gewählt wird. Es müssen vielmehr technische Entwürfe für das Wärmekraftwerk einerseits und für das Wasserkraftwerk anderseits so weit durchgeführt werden, daß man die Anlage- und Betriebskosten, d. h. die indirekten und direkten Betriebskosten für jeden Entwurf aufstellen und vergleichen kann: wirtschaftlich entscheiden kann. Schwierig gestaltet sich die Aufstellung solcher Entwürfe nicht zum mindesten noch dadurch, daß es nicht genügt, nur die augenblicklich vorliegenden Verhältnisse (z. B. Energiebedarf, Betriebskosten, Tarif der Konkurrenz usw.) zu berücksichtigen, sondern daß besonders auch die zukünftigen Verhältnisse wichtig sind. Gerade bei Wasserkraftwerken, weil die hohen Anlagekosten nur langsam getilgt werden können, wenn das Werk in den ersten Jahren überhaupt konkurrenzfähig sein soll.

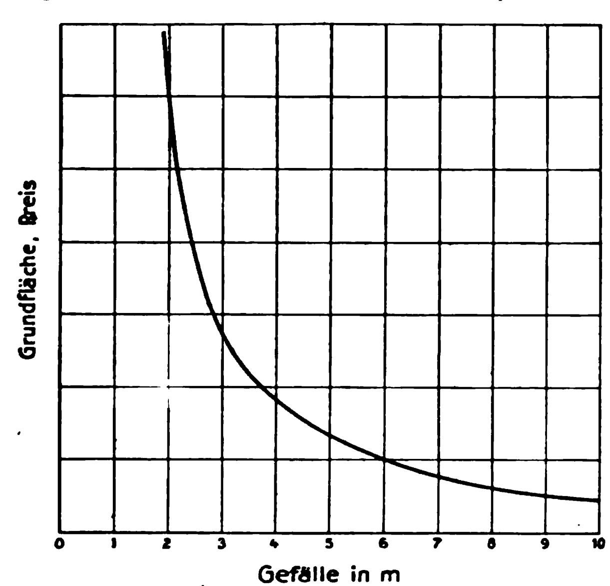
EINFLUSZ DER ÖRTLICHEN LAGE. Um es gleich vorwegzunehmen: Der Hauptgrund, warum so manche technisch gut ausbaufähige Wasserkraft brachliegen bleibt, ist ein wirtschaftlicher: die Höhe der indirekten Betriebskosten, die durch die hohen Anlagekosten wegen der teuren Wasserbauten bedingt ist.

Der Teil der Anlagekosten, der für die Anschaffung der Maschinen, insbesondere der Wasserkraftmaschinen, selbst aufzuwenden ist, spielt gegen die Gesamtsumme eine geringe Rolle. Die Wasserkraftmaschinen beanspruchen im Durchschnitt 4 bis 12 % der gesamten Bausumme, die kleineren Prozentsätze für höhere Gefälle geltend.

Liegt die Wasserkraft vom Ort des Energieverbrauchs sehr entfernt (Überlandzentrale), so werden die Anlagekosten sehr vergrößert durch die Ausgaben für das Leitungsnetz samt Umformerstationen.

Also Wichtigkeit der relativen Lage von Wasserkraft und Verbrauchsort nach Entfernung und Geländeart. Doch auch die geographische Lage an und für sich spielt eine Rolle. Schon die Hochbauten (Maschinenhaus) verteuern sich bei schwierigem Gelände und schlechten Zufuhrverhältnissen. Insbesondere aber sind es die eigentlichen Wasserbauten: Wasserfassung, -zuführung und -rückleitung, deren Kosten völlig von der Bodengestaltung und Bodenart abhängen.

Von der geographischen Lage der Wasserkraft hängt deren Größe und Charakter ab und werden die Ausbaukosten stark beeinflußt. Die vorhandene Energiemenge der Wasserkraft wird durch das Produkt aus Gefälle und Wassermenge gemessen. Zum ungefähren Abschätzen ist es üblich, mit einem Wirkungsgrad der Wasserkraftmaschine von 75% zu rechnen, so daß man die Leistung in Pferdestärken an der Maschinenwelle erhält aus $10 \times Q \times H$, wobei Q in Kubikmetern pro Sekunde und H in Metern zu messen ist. Eine Wasserkraftanlage mit kleinem Gefälle muß also eine entsprechend größere Wassermenge zur Verfügung haben als eine Anlage mit größerem Gefälle, falls in beiden Fällen gleiche Arbeitsleistung verlangt wird. Große Wassermengen bedingen umfangreichere Wasserbauten, auch teurere Wasserkraftmaschinen. In Abbildung 44 ist dargestellt, wie die beanspruchte Grundfläche und der Preis der Wasserkraftmaschine für eine Pferdestärke Leistung fällt bei vergrößertem Gefälle. Es ist ein und dieselbe Turbine unter verschiedenes Gefälle gesetzt gedacht. Die Abhängigkeit der Kosten des Wasserbaues von Gefälle und Leistung läßt sich nicht so einfach darstellen, ist aber meist ähnlich. Wohl zu beachten ist dabei die Vereinfachung der Wasserbauten in Fällen, die wegen kleiner Wassermenge die Anwendung einer Rohrleitung gestatten. Aus diesen Überlegungen und weil selbstverständlich eine Anlage für beispielsweise doppelte Leistung nicht etwa die doppelten Anlagekosten der für einfache Leistung beanspruchen wird, sondern weit weniger (siehe Abbildung 45: Gefälle konstant, Turbinengröße wachsend), erklärt sich das Streben nach großen Gefällen, großen Leistungen, nach wenigen großen Maschinen: Konzentration von Gefälle und Leistung.



Abbild. 44. Beanspruchte Grundfläche pro P.S. und Preis pro P.S. einer Francisturbine bei verschiedenem Gefälle.

Von der geographischen Lage der Wasserkraft hängt auch deren Charakter ab: die Art und Weise, wie die Wassermenge im Verlaufe des Jahres schwankt.

Selbst wenn sich nun auch der Energiebedarf dieser in wechselnder Größe von der Natur gespendeten Energiemenge anpassen könnte — es wird auf diesen Punkt nochmals zurückzukommen sein —, so ist selbst in diesem günstigsten Falle der

Übelstand schwerwiegend, daß z. B. die Anlage, also Maschinen, Maschinenhaus und insbesondere die Wasserbauten, in einem Umfang ausgebaut sind, der einer Wassermenge entspricht, die nur an wenigen Tagen des Jahres zur Verfügung steht. Man hat also hohe indirekte Betriebskosten, aber eine verhältnismäßig nur geringe Durchschnittsleistung. Und das um so mehr, je verschiedener die Wassermenge im Verlaufe des Jahres ist. Die Abbildung 46 zeigt als typisches Beispiel die aus siebenjährigen Beobachtungen erhaltenen mittleren Wassermengen eines Gebirgsflusses für die einzelnen Monate des Jahres. Die durchschnittliche mittlere Wassermenge ist 41,8 cbm pro Sekunde, während die Wassermenge im Juni bis auf 112 m³-sek steigt. Es wäre natürlich selbst bei den denkbar schmiegsamsten Energiebedarfsverhältnissen unsinnig, das Werk für diese 112 m³-sek, die nur ganz kurze Zeit verfügbar sind, auszubauen. Zur Abbildung 46 ist noch hinzuzufügen, daß im Verlaufe der sieben Beobachtungsjahre einmal (im Monat August) eine größte Hochwassermenge von 615 m³-sek und einmal (im Monat Januar) eine niedrigste Wassermenge von 15 m³-sek festgestellt wurde. Bezüglich der kleinsten Wassermenge sei wieder auf noch folgende Bemerkungen verwiesen.

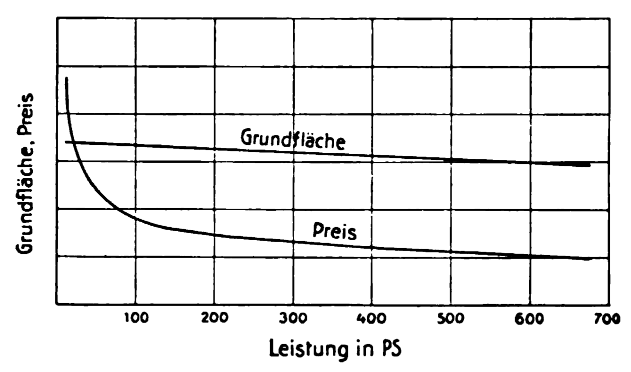


Abbildung 45. Beanspruchte Grundfläche pro P.S. und Preis pro P.S. von verschieden großen Francisturbinen bei gleichem Gefälle.

Die größte Hochwassermenge ist deshalb von Bedeutung, weil bei der Wasserfassung (Wehr) darauf Rücksicht zu nehmen ist, daß auch die größte je vorkommende Hochwassermenge ohne Gefahr abgeführt werden muß, ev. ohne daß der Wasserspiegel eine Höhe überschreitet, die durch oberhalb des Werkes befindliche Anlieger begrenzt oder sonstwie unzulässig ist.

Endlich kann die geographische Lage der Wasserkraft noch insofern große Bedeutung haben, als sie mehr oder minder einfach die Anlage einer hydraulischen Reserve durch Stauweiher oder in geringerem Grade durch Behälter gestattet.

EINFLUSZ DES VERWENDUNGSZWECKES. Wichtig, ja gegebenenfalls entscheidend für die Wirtschaftlichkeit sind vor allem Verwendungszweck der aus der Wasserkraft gewonnenen Energie und die Betriebsart des damit versorgten Unternehmens. Zugleich mit der Feststellung der Leistungsfähigkeit der Wasserkraft ist ja auch der Leistungsbedarf abzuschätzen. In der Regel wird der Energiebedarf sich nicht jederzeit im Verlaufe eines Jahres oder Tages mit der durch die Wasserkraft gebotenen Energiemenge decken, sondern gelegentlich größer oder kleiner sein. Der letztere Fall hat insofern Bedeutung, als dann teure Anlagen schlecht ausgenutzt werden. In Abbildung 46 ist der einfache Fall angenommen, daß durch eine chemische Fabrik ständig während des ganzen Jahres eine Energiemenge von 4800 P.S. nutzbar verarbeitet werden könnte, die bei einem Gefälle von 10 m eine Wassermenge von rund 48 m³-sek verlangt. Aus der graphischen Darstellung ist ersichtlich, daß die vorhandene Wassermenge während längerer Zeit kleiner ist als die benötigte, daß nur eine Energiemenge gewonnen werden kann, die der Wassermenge der schraffierten Fläche entspricht, im Mittel 33,5 m³-sek, während die Anlage für

eine Wassermenge von 48 m^3-sek ausgebaut ist. Sollten die Anlagekosten 1440000 M. betragen haben, so ergibt sich bei 10 m Gefälle eine Anlagekostensumme von 300 M. pro ausgebaute Pferdestärke, die aber auf 430 M. pro geleistete Pferdestärke steigt, weil als durchschnittliche Leistung nur $10 \times 10 \times 33{,}5 = 3350$ P. S. einzusetzen ist. Eine nicht leichte Frage wäre die, bis zu welcher Leistung nun wirklich diese Anlage auszubauen ist? Man könnte ja so weit gehen und die Anlage nur für eine Wassermenge von 17 m^3-sek ausbauen, weil diese Wassermenge ständig vorhanden ist. Damit verringern sich zwar die Gesamtanlagekosten, und die Wasserkraftanlage wird dann jederzeit die Leistung abgeben können, für welche sie ausgebaut ist, d. h. die Anlagekostensumme pro ausgebaute und pro geleistete Pferdestärke ist identisch. Dabei ist aber wohl zu berücksichtigen, daß, wie schon bemerkt, die Anlagekostensumme zwar bei kleinerem Ausbau fällt, aber die Anlagekosten pro Leistungseinheit steigen, so daß der Fall denkbar ist, daß bei größerem Ausbau die Anlagekosten selbst pro geleistete Pferdestärke niedriger sind als bei kleinerem Ausbau die Anlagekosten pro ausgebaute (und geleistete) Pferdestärke. Der erwünschte größere Umsatz wird dann den größeren Ausbau wirtschaftlicher erscheinen lassen.

Schwieriger gestaltet sich die Entscheidung, wenn der Energieverbrauch in keiner Weise schmiegsam ist, sondern durch Bahnbetrieb, Speisung wichtiger Lichtnetze, Speisung von Fabriken, die ihren Energiebedarf nicht zeitweise einschränken können, in seiner Höhe festgesetzt ist. Da sind vor allem schon die Schwankungen des Energiebedarfs im Verlaufe eines Tages wohl zu beachten. Abbildung 47 zeigt die Belastungskurven einer amerikanischen Zentrale, in dem einen Bild an einem Junitage, in dem anderen an einem Dezembertage. Während der Junitag 1400 KW als höchste Belastung zeigt, werden an dem Dezembertage maximal 2900 KW verlangt. Diese Belastungsspitzen müssen durch Aushilfsanlagen übernommen werden. Die gleiche Notwendigkeit tritt dann ein, wenn die verfügbare Wasserkraft auch bei völligem Ausbau zeitweise dem Energiebedarf nicht genügen kann.

Es sind zur Aushilfe drei Mittel anwendbar: 1. Die Anlage eines Stausees, der bei geringer Beanspruchung die überschüssige Wassermenge sammelt und bei starker Beanspruchung die Wassermenge bis zum benötigten Betrage ergänzt. 2. Der Bau von Hochbehältern, die das zeitweise überschüssige, durch Pumpen emporbeförderte Wasser aufnehmen, um in Stunden großer Beanspruchung wieder das Wasser an eigene Turbinen abzugeben. 3. Für geringere Belastungsunterschiede Akkumulatorenbatterien. 4. Eine Reserveanlage mit Dampf- oder Verbrennungskraftmaschinen. Das erstgenannte Mittel ist anwendbar und mehr oder minder billig und ausgiebig, je nach der geographischen Lage der Wasserkraft: große, gegen Ende zu enge Talbecken können leicht zu ausgiebigen Stauseen verwendet werden, wenn nicht sowieso ein günstig gelegener See dazu dient, und bieten eventuell Ausgleichsmöglichkeit für die Dauer von Monaten. Besonders ausgiebig wird diese Energiereserve, wenn das Ausgleichbecken hoch über dem Krafthause liegt. Ein bemerkenswertes Beispiel dafür erwähnt die „Denkschrift über Einführung des elektrischen Betriebes auf den bayrischen Staatseisenbahnen“: Wenn dem Walchen-

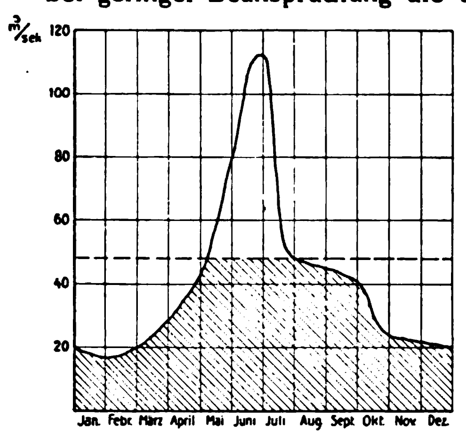


Abbildung 46. Mittlere Wassermengen eines Gebirgsflusses.

see, dessen Oberfläche mit 16,4 qkm in einer Höhe von 200 m über dem Kraftwerk liegt, kein Wasser zufließt, ihm aber so viel entnommen wird, daß 5700 P.S. geleistet werden, so senkt sich der Wasserspiegel in 24 Stunden nur um 15 mm.

Hochbehälter können natürlich nur für einige Stunden zum Ausgleich dienen. Die Kosten dieser Aushilfsanlage sind wohl zu beachten. Der Ausgleich durch Akkumulatorenbatterien ist ebenfalls nur für Stunden möglich und nicht billig.

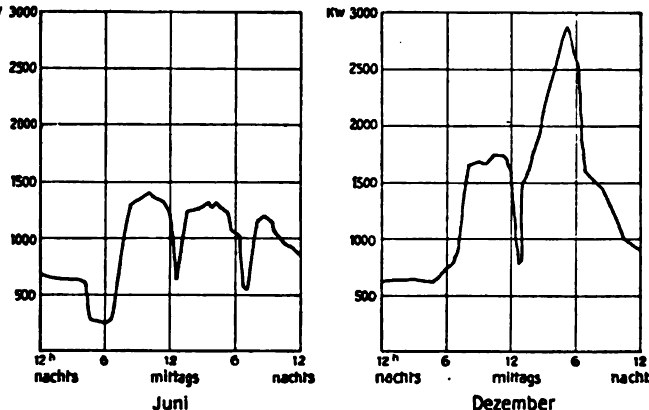


Abbildung 47. Belastung einer elektrischen Zentrale.

Jede beliebige Ausgleichs- und Ergänzungsmöglichkeit kann natürlich durch eine Reserveanlage mit Dampf- oder Verbrennungskraftmaschinen geschaffen werden. Die Kosten des Brennstoffes hängen sehr von der geographischen Lage des Werkes und den vorhandenen Verkehrswegen ab. Die indirekten Betriebskosten dieser Reserve für sich allein werden im Vergleich mit denen der eigentlichen Wasserkraftanlage gering sein, dagegen zeigen die direkten Betriebskosten wegen der teuren Brennstoffe hohe Werte. Die Aufstellung eines technischen Entwurfes für die Reserve, womöglich unter Annahme verschiedener Leistungsgröße, und die Berechnung der direkten Betriebskosten muß entscheiden lassen, bis zu welcher Größe und Benutzungsdauer die Aufstellung und Benutzung einer solchen Wärmekraftreserve noch wirtschaftlich sein wird. Allerdings spielt dabei oft noch die Rücksicht auf Betriebssicherheit eine Rolle, die zur Aufstellung der Reserve führen kann, und die sich nicht als Zahlenwert einführen läßt, daher nach ihrem wirtschaftlichen Werte schwer abzuschätzen ist.

Bisher wurde gezeigt, daß die geographische Lage (in weiterem Sinne des Wortes) für sich, daß Betriebsart und Verwendungszwecke für sich und im Zusammenhang mit der geographischen Lage, daß die relative Lage von Wasserkraft und Energieverbrauchsort die Wirtschaftlichkeit einer Wasserkraftanlage stark beeinflussen.

Getrennt von diesen allgemeineren Betrachtungen muß nochmals auf die Wichtigkeit des „Ausnutzungsfaktors", das ist das Verhältnis der durchschnittlich abgegebenen Leistung zu der durch den Ausbau bedingten größtmöglichen Leistung, hingewiesen werden, und zwar hinsichtlich einer „reinen" Wasserkraftzentrale, ohne alle Reserve. Zwei Ursachen können diesen Unterschied zwischen durchschnittlicher Leistung und größtmöglicher Leistung oder zwischen abgegebener Leistung und ausgebauter Leistung bedingen. Es kann der Unterschied der Wassermenge im Verlaufe der Monate es unmöglich machen, bei immer vorhandenem größtem Energiebedarf, die volle Leistung abzugeben, oder aber, es würde zwar die nötige Wassermenge immer vorhanden sein, um die durch den Ausbau gegebene Leistung zu liefern, es sinkt aber der Energiebedarf zeitweise unter den durch Ausbau deckbaren Betrag.

Typische Kurven dafür sind einmal die in Abbildung 46 gebrachten Wassermengenkurven eines Gebirgsflusses, anderseits die in Abbildung 47 gegebenen Belastungskurven eines Werkes. Die erste zeigt die Änderung im Verlaufe eines Jahres. Die Änderungen der Wassermenge im Verlaufe eines Tages sind zumeist nicht so hoch,

daß sie die ausgebaute Wassermenge erheblich berühren. Die zweite Kurve zeigt die Änderung des Energiebedarfs eines Elektrizitätswerkes im Verlaufe eines Tages. Hier sind wieder die Änderungen dieser Belastungskurve im Verlaufe des Jahres meist nicht so sehr bedeutend.

BEISPIELE. Die Hauptgesichtspunkte für die wirtschaftliche Beurteilung von Wasserkraftanlagen sind im vorstehenden schon gegeben. Einige schärfer umrissene Einzelfälle mögen im folgenden zeigen, wie sich die Wichtigkeit der einzelnen Faktoren je nach den besonderen Verhältnissen ändert.

Zuerst die Verhältnisse in größeren Städten. Soll hier eine Wasserkraftanlage errichtet werden, so ist wohl zu beachten, daß erfahrungsgemäß eine städtische Elektrizitätszentrale nie gleichzeitig von allen Stromabnehmern und mit größtem Bedarf beansprucht wird, so daß im Mittel nur 30—40 % der Energie abzugeben sind, die zu liefern wäre, wenn alle Anschlußstellen gleichzeitig volle Leistung verlangten. Die Benutzungsdauer der vollen Leistungsfähigkeit des Werkes ist etwa mit 700 bis 1100 Stunden im Jahre einzuschätzen. Die Anlage einer eigenen Wärmekraftreserve kann bei städtischen Wasserkraftanlagen unter Umständen erspart werden, weil vielleicht schon vorhandene Dampfzentralen dazu dienen können.

Bei gleichem Betriebszweck kann im Einzelfall doch die Betriebsart anders gestaltet sein. Ein Beispiel bietet Luzern, wo der Lichtbedarf, entgegen der allgemeinen Regel, im Sommer stärker als im Winter ist, da die großen Hotels und die Promenade während der Zeit des lebhaften Fremdenverkehrs des Abends verschwenderisch beleuchtet sind.

Sehr starke Schwankungen im Kraftbedarf haben Vollbahnnetze. Nach Schweizer Berichten beträgt dort oft die größte Beanspruchung im Verlaufe von Stunden den fünffachen Wert der durchschnittlichen. Es ist höchst interessant, in einer solchen Elektrizitätszentrale für Bahnbetrieb zuzusehen, wie die Turbinen von ihren Regulatoren unausgesetzt in weitem Regulierbereich geöffnet und geschlossen werden, um bei den starken Energiebedarfsschwankungen des Bahnnetzes die für die konstant zu haltende Stromspannung nötige konstante Drehzahl einhalten zu können. Diese höchst ungleichmäßige Werkbeanspruchung ist einer der Gründe, die bisher die Einführung des elektrischen Bahnbetriebes erschwert haben, da auch die Wärmekraftzentralen ohne die kostspielige und aus technischen Gründen für Bahnbetrieb umständliche elektrische Akkumulierung solch starken Schwankungen nicht folgen können. Die Schwankungen des Energiebedarfs der einzelnen Monate dagegen wären z. B. für das bayerische Bahnnetz (nach der „Denkschrift") recht gering, da der Minderbedarf des geringeren Verkehrs im Winter gegenüber dem Sommer durch Heizung der Züge und Mehrbeanspruchung durch Beleuchtung ausgeglichen wird.

Industrielle Anlagen zeigen in ihrer Eignung für Strombezug aus Wasserkraftanlagen recht starke Unterschiede, wie an drei charakteristischen Beispielen gezeigt werden soll.

Große Maschinenfabriken sind wegen der benötigten großen Arbeiterzahl in der Regel an die Nähe größerer Städte gebunden und bedürfen für die Heranschaffung der Rohstoffe und wegen des Versands der Erzeugnisse guter Eisenbahnverbindungen. Eine ausbaugünstige Wasserkraft, die aber in einem abgelegenen, spärlich bewohnten Landesteil liegt, hätte für eine solche Fabrik wenig Wert. Ferner hat ein Unternehmen mit vielen Arbeitern Interesse daran, diese möglichst stetig zu beschäftigen, wodurch sich außerdem zugleich die Verzinsung des in den Fabrikeinrichtungen festgelegten Kapitals verbessert. Einem Wechsel an dargebotener Energie,

Änderungen in der Wassermenge, könnte sich solch ein industrielles Werk nicht anschmiegen.

Anders würden die Verhältnisse schon z. B. bei einer Holzschleiferei liegen. Wenn es die Lieferzeiten der Bestellungen erlauben, kann sie mit ihrer kleineren Arbeiterzahl in Zeiten des Wassermangels leichter den Betrieb etwas einschränken.

Am anpassungsfähigsten an wechselnd gebotene Naturenergie ist die elektrochemische und elektrometallurgische Industrie. Allerdings muß auch sie, der Verzinsung der teuren Anlagen und Einrichtungen wegen, Wert auf intensive Fabrikation legen; aber die Arbeiterzahl ist gering innerhalb einer Fabrik mit meist sehr großem Energiebedarf. Billige Energielieferung ist hier der wichtigste wirtschaftliche Faktor. Längere Fernleitungen lassen sich zumeist vermeiden, da wegen der kleinen Arbeiterzahl die Fabrik in die Nähe der Wasserkraft gelegt werden kann. Diese neueren Industriezweige für Herstellung von Kalziumkarbid, Soda, Chlor, Pottasche, Aluminium, für Veredlung von Metallen, für Gewinnung des Luftstickstoffs eignen sich daher hervorragend zur Ausnutzung großer, wenn auch abgelegener und unkonstanter Wasserkräfte, falls diese nur billig in Erwerb und Ausbau sind.

Die zwei folgenden Tabellen lassen die Verteilung der in Süd- und Ostfrankreich bzw. in der Schweiz ausgebauten Wasserkräfte für die einzelnen Verwendungszwecke überblicken.

Von größeren Wasserkraftanlagen in Süd- und Ostfrankreich sind verwendet:

	in Pferdestärken		in % der Summe	
Aluminium-Industrie	18100	88910	9	44
Metallurgische Industrie	22500		11	
Chlorkalk- und Pottasche-Industrie	15500		8	
Kalziumkarbid-Industrie	19310		9	
Soda- und Chlor-Industrie	13500		7	
Licht und Kraft	81681		40	
Verschiedene Industrien	31450		16	
Zusammen	202041		100	

Von insgesamt 170000 P.S. in Wasserkraftanlagen der Schweiz sind verwendet für:

Voll- und Straßenbahnen	13 %
Elektrochemie	23 %
Licht	40 %
Kraft	24 %

VERFÜGBARE WASSERKRÄFTE. Nachdem so die Gesichtspunkte beim Ausbau von Wasserkräften aufgestellt wurden, soll zum Schluß noch ein Überblick gegeben werden über die schon ausgenutzten und die noch brachliegenden ausbaufähigen Wasserkräfte.

Nach Koehn, Ausbau von Wasserkräften, sind schätzungsweise an Wasserkräften ausbaufähig:

	P.S.		P.S. pro qkm		P.S. pro 1000 Einw.
Deutschland	1425900	=	2,6	=	24,5
Großbritannien	963000	=	3,06	=	23,1
Österreich-Ungarn	6130200	=	9,1	=	130
Frankreich	5857300	=	10,9	=	150
Italien	5500000	=	19	=	169
Schweden	6750000	=	15	=	1290
Norwegen	7500000	=	20	=	3409
Schweiz	1500000	=	36,6	=	454,5

1905 ausgebaut:

		ausgebaut in % der ausbaufähigen Pferdekräfte
Deutschland	294400 P. S.	20,5
Frankreich .	650000 „	11,1
Italien . .	464000 „	8,4
Schweiz . .	380000 „	25,3

Abgesehen von den wirtschaftlichen Rücksichten geben auf die Frage des Ersatzes der Wärmekraft durch Wasserkraft in Deutschland am besten die Angaben (aus Koehn) Antwort, daß 1905 in Deutschland 5400000 P. S. durch Wärmekraft geleistet wurden, daß aber im ganzen nur 1425900 P. S. aus Wasserkräften könnten gewonnen werden. Also selbst wenn, was ausgeschlossen ist, der Kraftbedarf im Laufe der Jahre nicht mehr steigen würde und wenn alle ausbaufähigen Wasserkräfte benutzt würden, könnte in Deutschland nur 1/4 der benötigten Energie aus Wasserkräften erhalten werden.

Frankreich ist da in einer weit günstigeren Lage, da ein Kraftbedarf von 3120000 P.S. durch Wärmekraft gedeckt wurde, während aus Wasserkräften 5857300 P. S. gewinnbar wären.

Große Wasserkräfte sind noch an Küstenländern bei Ebbe und Flut zu gewinnen. Die Wirtschaftlichkeit der Ausnutzung dieser Energie wurde bisher immer noch wegen der nötigen umfangreichen Bauten (Sammelbecken) bezweifelt. Neuerdings liegen aber günstigere Urteile vor und wird die Errichtung eines Flutkraftwerks in der Nähe von Hamburg ernstlich in Betracht gezogen. Die ungeheure Steigerung des Kohlenverbrauchs bedingt größere Fördertiefen, Verteuerung des Abbaues, steigende Kohlenpreise. Ein praktisch wirtschaftlicher Ersatz der Kohlenenergie ist, wenigstens für große Leistungen in weitem Bereiche, außer der Wasserkraft noch nicht gefunden. Um so wichtiger wird mit jedem Tage der Ausbau der noch nicht genutzten 4/5 der Wasserkräfte Deutschlands. Tiefbau, Maschinenbau und Elektrotechnik haben da noch große Aufgaben zu lösen, um diese Wasserkräfte billig und betriebssicher nutzbar zu machen.

DIE STARKSTROMTECHNIK

VON K. SIMONS

1. DIE ELEKTRISCHE MESZTECHNIK

Die elektrische Meßtechnik hat deshalb eine ganz besondere Bedeutung, weil allein elektrische Energie allgemein wirklich als Energie, nämlich nach Kilowattstunden, verkauft wird, während wir die Energie fester Körper, vor allem der Kohle, nicht als solche, sondern den Körper selbst nach Gewicht kaufen und uns nur in der Technik ein Mindestmaß an Energie pro Kilogramm, nämlich den Heizwert, garantieren lassen. Der gewöhnliche Konsument kennt selbst diese Forderung beim Einhandeln seines Energievorrats nicht. Vielmehr werden flüssige und gasförmige Energiequellen sogar nach Volumen verkauft, was bei den gasförmigen den weiteren Mangel ergibt, daß das Gewicht und also auch die Energie eines bestimmten Volumens vom Druck abhängig ist. Aber nicht nur diese bisher einzigartige wirtschaftliche Bedeutung besitzt die elektrische Meßtechnik; die Behandlung der Meßinstrumente ergibt noch einen weiteren Vorteil: sämtliche Kräfte, die in den elektrischen Maschinen bei der Umsetzung mechanischer oder elektrischer Energie auftreten, sind auch in den Meßinstrumenten, aber meist in einfacher, leichtverständlicher Form tätig, so daß auch aus diesem Grunde ihre Darstellung wertvoll ist.

TECHNISCHE ZEIGERINSTRUMENTE FÜR GLEICHSTROM. In einer Gleichstromzentrale, die etwa ein Stadtgebiet mit Licht und Kraft versorgt, finden wir heute stets nur zwei verschiedene Arten von Zeigerinstrumenten: Strommesser oder Amperemeter und Spannungsmesser oder Voltmeter. Konstruktiv sind sogar beide kaum voneinander zu unterscheiden, nur geht durch das Amperemeter der ganze im Netz verbrauchte Strom, jedenfalls ein ihm proportionaler Teil, während die Klemmen des Voltmeters unter Vorschaltung eines großen Widerstandes direkt an die zu messende Spannung gelegt werden, so daß es ebenfalls von einem Strom, aber einem sehr kleinen, durchflossen wird (Abbildung 1). Dieser Strom ist nun der Spannung proportional. Das folgt aus dem berühmten Ohmschen Gesetz: die Spannung (in Volt) ist gleich dem Produkt aus Widerstand (in Ohm) und dem durch ihn fließenden Strom (in Ampere). Wegen dieser Proportionalität kann ein solches auf einer Stromwirkung beruhendes Instrument direkt als Spannungsmesser geeicht werden. Von den vielen möglichen Konstruktionen von Volt- oder Amperemetern für Gleichstrom behaupten ganz allein zwei

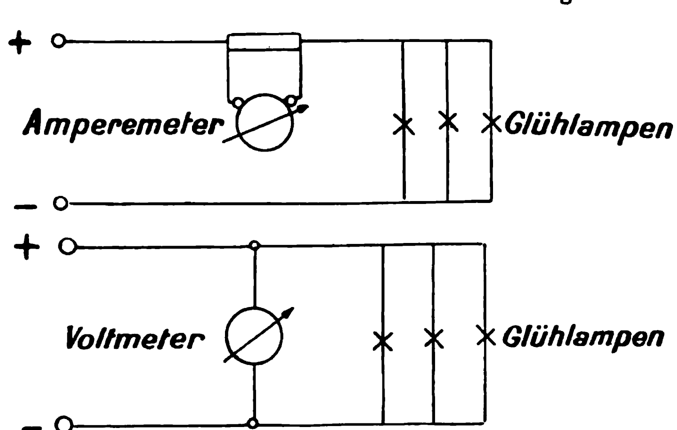


Abbildung 1. Schaltung eines Amperemeters mit Nebenschluß und eines Voltmeters mit eingebautem Vorschaltwiderstand.

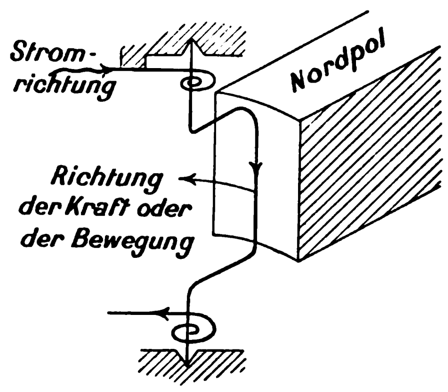


Abbildung 2. Stromdurchflossener Leiter im magnetischen Feld.

das Feld. Am genauesten und zuverlässigsten ist das Drehspul- oder Westoninstrument, so genannt nach dem Amerikaner, der es in die Technik einführte, während es als Galvanometer nach Deprez-d'Arsonval im Laboratorium schon lange bekannt war. Es wird auch vielfach als Präzisionsinstrument bezeichnet. Es beruht auf der Kraft, die ein stromdurchflossener Leiter in einem Magnetfeld, hier dem eines permanenten Magneten, nach Abbildung 2, erfährt; es ist dies dieselbe Kraftwirkung, die auch in sämtlichen Gleichstrommotoren wirksam ist, und deren Umkehrung, die Bewegung eines metallischen Leiters in einem Magnetfelde, zur Konstruktion sämtlicher Dynamos führt. Gegen jene Kraft sucht eine Feder den Leiter, eine kleine Spule (Abbildung 3a und 3b), in die Ruhelage zurückzudrehen. Stellt sich der mit der Spule verbundene Zeiger in die Gleichgewichtslage ein, so ist an der Skala der Strom resp. die Spannung direkt abzulesen. Genauigkeit, rasche Einstellung, d. h. gute „Dämpfung", sind die besonderen Vorzüge dieser Instrumente, doch sind sie entsprechend teuer.

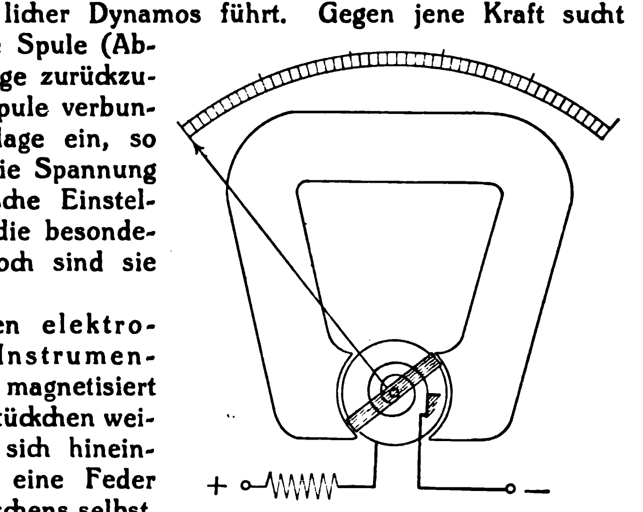


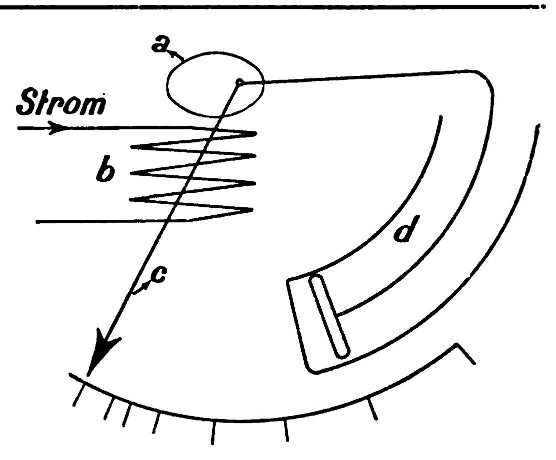
Abbildung 3a. Schematische Darstellung eines Drehspulinstruments.

Vielfach wird daher den billigen elektromagnetischen oder Weicheisen-Instrumenten der Vorzug gegeben. In ihnen magnetisiert eine stromdurchflossene Spule ein Stückchen weichen Eisens und sucht es dabei in sich hineinzuziehen. Eine Gegenkraft, etwa eine Feder oder auch das Gewicht des Eisenstückchens selbst, dient dazu, desgleichen Zeiger und Skala sind ebenso wie bei den Drehspulinstrumenten vorhanden, meist dazu noch eine besondere Dämpfungseinrichtung. Eine der außerordentlich vielen vorhandenen Konstruktionen möge in Abbildung 4 u. 5 herausgegriffen werden. Die Genauigkeit läßt zu wünschen übrig. Denn die Magnetisierung des Eisens, die wir uns heute als eine Richtung kleinster, zunächst wirr gelagerter Magnete im Eisen (Molekularmagnete) vorstellen, ist von seiner Vorgeschichte abhängig. War das Eisen schon stärker magnetisiert, so sucht es seinen Magnetismus beizubehalten, oder es ist bei sinkendem Strom ein stärkerer Magnetismus im Eisen vorhanden als bei steigendem. Es ist dies bekanntlich die Erscheinung der „Hysterese" (Nachhinken), sie ist die Quelle der Ungenauigkeit der elektromagnetischen Instrumente. Erst in den letzten Jahren ist es

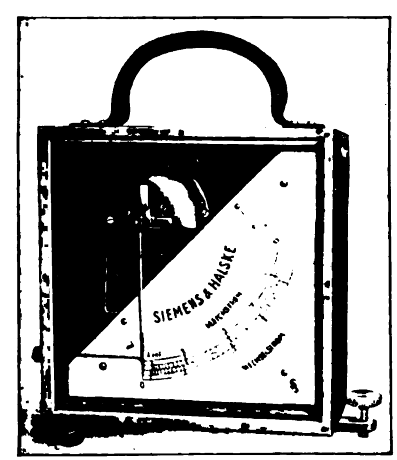

Abbild. 3b. Drehspulinstrument der Europäischen Weston-Ges., geöffnet.

gelungen, durch Änderung der chemischen Zusammensetzung, und zwar durch Legierung des Eisens, ein Material zu gewinnen, das nur noch in geringem Maße die Mängel der Hysterese zeigt.

Leistungszeiger findet man in einer Gleichstromzentrale nicht, da sich bei Gleichstrom die Leistung in Watt stets als Produkt aus Strom und Spannung ergibt: Watt = Volt × Ampere. Ein Blick auf die Meßinstrumente, bei konstanter Spannung sogar allein auf den Strommesser, zeigt uns also die Größe der in jedem Moment umgewandelten Energie mit einer Genauigkeit bis auf ein Prozent und weniger, ja, wir können die in verschiedenen Stadt- oder Landesteilen verbrauchte Energie durch Einschaltung von Strommessern in die einzelnen Verteilungsleitungen auch einzeln kontrollieren, so daß uns Störungen und abnorme Verhältnisse sofort auffallen, ein Vorzug, den wir bei keiner Energieverteilung außer der elektrischen kennen.



Abbild. 4. Schematische Darstellung eines Weicheiseninstruments. a — Weicheisenstück, b — Stromspule, c — Zeiger mit Skala, d — Luftdämpfung.



Abbild. 5. Weicheiseninstrument für Laboratoriumsgebrauch (ältere Type) von Siemens & Halske. (Geöffnet.)

Der Energieverbrauch der Instrumente selbst ist dabei ein äußerst geringer, durch die Spule eines Voltmeters geht etwa ein Hundertstel Ampere. Ein eingeschaltetes Amperemeter erzeugt etwa einen Spannungsverlust von $\frac{1}{10}$ Volt in der Leitung.

ZEIGERINSTRUMENTE FÜR WECHSELSTROM.

In Wechselstromzentralen findet man keine Drehspulinstrumente. Der Strom (vergleiche Abbildung 6), der nach europäischer Gepflogenheit hundertmal in der Sekunde seine Richtung wechselt oder 50 Perioden pro Sekunde oder 3000 Perioden pro Minute besitzt — ausgenommen davon ist nur der Betrieb elektrischer Wechselstrombahnen —, würde den Zeiger eines solchen Instruments nur fünfzigmal nach der einen Seite und fünfzigmal nach

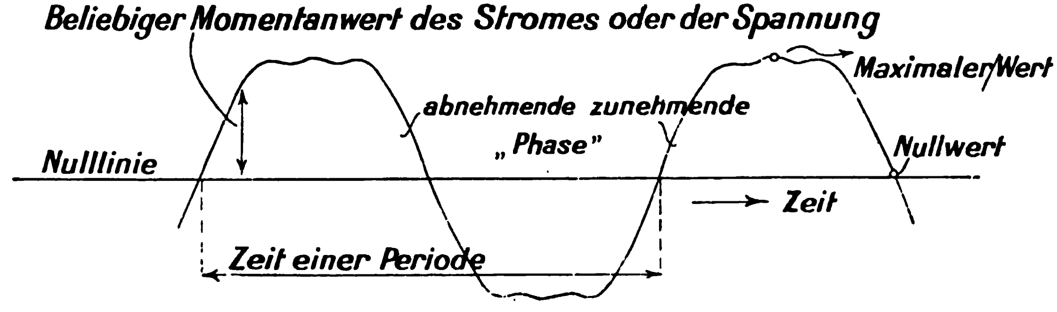


Abbildung 6. Beliebige Kurve eines Wechselstroms oder einer Wechselspannung.

der anderen Seite in der Sekunde zu drehen suchen. Denn die Kraft, die auf einen stromdurchflossenen Leiter in einem konstanten Magnetfeld wirkt, kehrt mit der Stromrichtung auch ihre Richtung um. Der Zeiger würde infolge seiner Trägheit in Ruhe bleiben. Man kann dagegen den Strom durch einen Widerstandsdraht (Hitzdraht) gehen lassen, es setzt sich alsdann Energie in Wärme um (Joulesche Wärme), und die Verlängerung des Drahtes durch die Erwärmung kann vergrößert auf ein Zeigerwerk übertragen werden (Abbildung 7).



Abbildung 7. Geöffnetes Hitzdrahtinstrument von Dr. Paul Meyer A.-G. Mit Hebel- und Fadenübertragung auf den Zeiger, Kurzschlußvorrichtung und elektromagnetischer Dämpfung.

Als Einheit des Wechselstroms — und zwar ebenfalls als 1 Ampere — wird derjenige Strom bezeichnet, welcher in einem solchen Hitzdrahtinstrument denselben Ausschlag hervorruft wie die Einheit des Gleichstroms. Man nennt den angezeigten mittleren Wert Effektivwert des Wechselstroms. Ebenso zeigt ein Hitzdrahtvoltmeter den Effektivwert der Wechselspannung an. Für Gleichstrom werden Hitzdrahtinstrumente nie gebraucht, weil sie bei gleichem Preis den Präzisionsinstrumenten an Genauigkeit nachstehen.

Will man zur Konstruktion eines Wechselstrom-Voltmeters oder Amperemeters doch die Kraft benutzen, die ein stromdurchflossener Leiter in einem Magnetfeld erfährt, so muß man den permanenten Magneten des Drehspulinstruments durch das Magnetfeld einer Spule ersetzen, die von demselben Strome wie die bewegliche durchflossen wird, etwa nach Abbildung 8. Dann erzeugt diese feste Spule ein magnetisches Feld, das gleichzeitig oder synchron mit dem Strom und ihm proportional seine Richtung und Stärke ändert. Da nun die Kraft, die auf einen beweglichen Leiter ausgeübt wird, stets dem Produkt aus der Stärke des magnetischen Feldes und der Stromstärke in dem beweglichen Leiter proportional ist, so wird die Kraft wohl noch hundertmal ihre Stärke ändern, und zwar proportional dem Quadrat des momentanen Stroms, aber nicht mehr ihre Richtung. Der Ausschlag des Zeigers ist wieder von dem effektiven Wert des Wechselstroms abhängig, und auch dieses Instrument kann man mit Gleichstrom eichen. Die so gebauten Instrumente heißen Dynamometer, auch sie werden nur für Wechselstrom benutzt, da sie für Gleichstrom durch die Drehspulinstrumente bei ungefähr gleichem Preis übertroffen werden. In einem späteren Abschnitt werden wir in den Wechselstrom-Kommutatormotoren Maschinen finden, die auf dem gleichen Kraftprinzip beruhen.

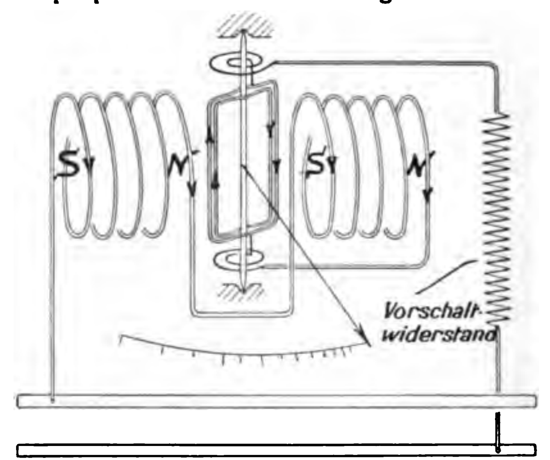


Abbildung 8. Schematische Darstellung eines Dynamometers als Voltmeter.

Auch elektromagnetische Instrumente reagieren auf Wechselstrom und werden wegen ihrer Billigkeit am meisten verwandt. Da sich der Magnetismus des weichen Eisenstückchens in den gewöhnlichen Instrumenten aber wegen der Hysterese nicht

gleichzeitig und proportional mit dem Strome ändert, zeigen sie nur mäßig genau und sind für die zu verwendende Periodenzahl besonders zu eichen (vgl. Abbildung 5).

Als Spannungsmesser kommen noch bei hohen Spannungen, wie sie nur bei Wechselstrom vorkommen, elektrostatische Voltmeter bisweilen in Betracht; sie beruhen auf der Anziehung oder Abstoßung elektrisch geladener Leiter. Meist werden aber hohe Spannungen besonderen Meßtransformatoren zugeführt, und aus der mit gewöhnlichen Instrumenten zu messenden Niederspannung und den Daten des Transformators, seinem sogenannten Übersetzungsverhältnis, wird die Hochspannung berechnet; der Messende oder das Instrument kommt dabei also gar nicht mit der Hochspannung selbst in Berührung, und das ist natürlich ein großer Vorteil. Ebenso bedient man sich zur Messung der Wechselströme bei sehr hohen Spannungen oder sehr großen Stromstärken der Stromtransformatoren.

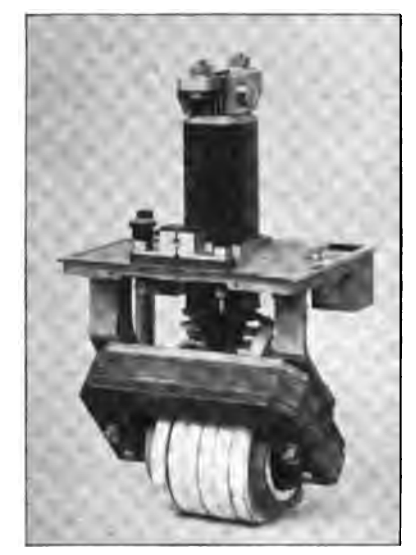


Abbildung 9. Präzisions-Stromtransformator von Siemens & Halske. Die oberen Klemmen werden mit der Hochspannungsleitung verbunden, die Klemmen auf der Platte mit dem Instrument und einer Erdleitung. Schutzkasten entfernt.

In Wechselstromzentralen wird im Gegensatz zu der Gleichstromzentrale stets die Leistung mit besonderen Leistungsmessern gemessen. Sendet man durch die feste Spule des Dynamometers der Abbildung 10a einen Strom proportional dem Netzstrom, durch die bewegliche einen solchen proportional der Spannung, so ist die Ablenkung des Zeigers proportional der mittleren Leistung, da die momentane ablenkende Kraft eben dann proportional dem Produkt aus der momentanen Stromstärke und Spannung ist: Dynamometrische Wattmeter.

Abbildung 10a. Schaltung eines Wattmeters nach dem Dynamometerprinzip.

Leistungsfaktor. Bei Wechselstrom ist die vom Leistungsmesser oder Wattmeter angezeigte Leistung nicht mehr stets gleich dem Produkt aus effektiver Stromstärke und effektiver Spannung, also den Angaben der Wechselstrom-Ampere- und Voltmeter, oder gleich den „scheinbaren Watt", sondern oft kleiner. Man nennt das Verhältnis von angezeigten zu scheinbaren Watt den Leistungsfaktor, der stets gleich oder kleiner als 1 ist. Die Möglichkeit eines kleinen Leistungsfaktors ersieht man am besten aus der graphischen Darstellung der verschiedenen Größen als Funktion der Zeit. Die momentane Leistung ist, wie bei Gleichstrom, gleich dem Produkt aus dem momentanen Strom und der momentanen Spannung, sie ändert



Abbildung 10b. Geöffnetes transportables Wattmeter der Hartmann & Braun A.-G. Oben der Vorschaltwiderstand auf Rollen, dann in der festen „Stromspule" die bewegliche „Spannungsspule", unten der ebenfalls geöffnete Luftdämpfungskasten in Ringsegmentform.

also ebenfalls mit der Zeit ihre Größe. Es können auch Beträge mit entgegengesetztem Vorzeichen vorkommen, wie in Abbildung 11, wo die Spannung und der Strom nicht zu gleicher Zeit Null werden oder in ihrer „Phase" gegeneinander verschoben sind. Sind dieselben Werte von Strom und Spannung gleichphasig wie in Abbildung 12, so ist der Mittelwert der Leistung naturgemäß größer als vorhin, wo wir zum Teil negative Werte hatten. „Phasengleichheit" ist stets bei einem einfachen Widerstand vorhanden, in dem die Energie des Wechselstroms nur in Wärme umgesetzt wird. Ein solcher Widerstand für den elektrischen Strom ist z. B. eine Glühlampe. Dann ist auch der Leistungsfaktor gleich 1.

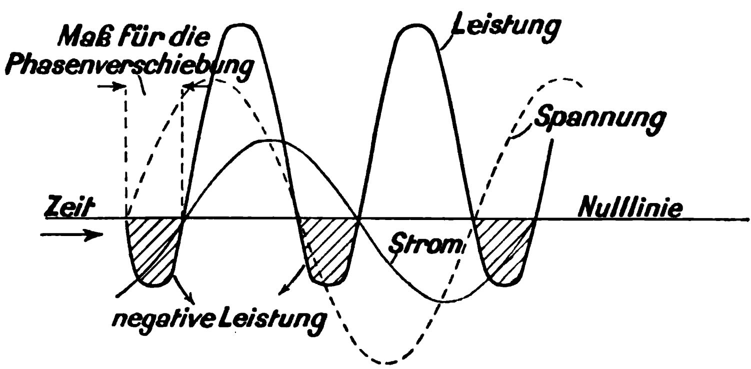


Abbildung 11. Spannung, Strom und Leistung bei einem Leistungsfaktor kleiner als 1.

Eine „Phasenverschiebung" ist erst dann möglich, wenn der Wechselstrom ein magnetisches Feld erzeugt, das, wie schon in einem früheren Abschnitt ausgeführt wurde und wie auf S. 268 noch genauer dargestellt wird, der Sitz einer umwandlungsfähigen, reversiblen Energie ist, im Gegensatz zu der in Wärme umgesetzten Energie. Ändert sich also das magnetische Feld, so nimmt es entweder Energie auf, oder es gibt solche ab. In einem Moment ist daher mehr Energie aufzubringen, als der durch den Widerstand des Leiters entstehenden Wärme entspricht, und zwar wenn sich das Magnetfeld bildet; es ist dann auch eine höhere Klemmenspannung für einen bestimmten Strom als bei Gleichstrom erforderlich. Im nächsten Moment liefert das magnetische Feld Energie in den Stromkreis zurück, oder wir können wirklich von einer bald positiven, bald negativen Leistung sprechen. Man bezeichnet den Vorgang als die Erscheinung der „Selbstinduktion", wir haben es in diesem Falle der Phasenverschiebung mit einem Leistungsfaktor kleiner als 1 zu tun.*

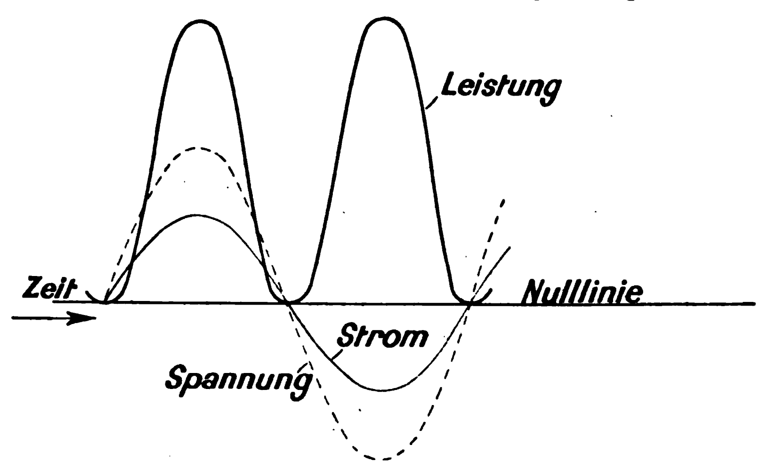


Abbildung 12. Spannung, Strom und Leistung bei einem Leistungsfaktor gleich 1.

Transformation. Wie leicht einzusehen, kann und wird das magnetische Feld seine Energie nicht nur an den Stromkreis wieder abgeben, durch den es erzeugt worden ist, sondern in ähn-

* Wegen des Begriffs der Kapazität und ihrer Bedeutung für die Technik siehe Anm. S. 267.

licher Weise auch an einen anderen, der räumlich ähnlich gelegen ist — das Problem der Transformation oder Induktion, das bekanntlich deshalb nur mit Wechselstrom lösbar ist. Bei Gleichstrom sitzt im Magnetfeld freilich auch Energie, die aber nur beim Einschalten des Stroms einmal aufzuwenden ist. Dann aber ist zur Erhaltung des Feldes keine Energie mehr nötig, abgesehen von derjenigen, die in Wärme wegen des Widerstandes der betreffenden Spule umgesetzt werden muß. Erst bei Öffnen eines Gleichstromkreises tritt sie wieder als unangenehme Funken- oder Lichtbogenbildung in die Erscheinung. Die „induzierte" Spannung, die wir an der sekundären Seite des Spannungstransformators messen können, verhält sich zu der gegebenen wie die Windungszahlen der beiden Spulen, die Stromstärken in den Stromtransformatoren umgekehrt wie sie, sofern nur das magnetische Feld für beide Spulen dasselbe ist. Deshalb werden die heutigen besten Meßtransformatoren als ein einziges geschlossenes Eisenblechpaket ohne Fugen gebaut, auf das die beiden Spulen möglichst dicht übereinander aufgewickelt sind (Abbildung 9). Prinzipiell sind sonst Spannungs- und Stromtransformatoren von den großen später zu besprechenden Transformatoren zur Umwandlung elektrischer Energie nicht verschieden.

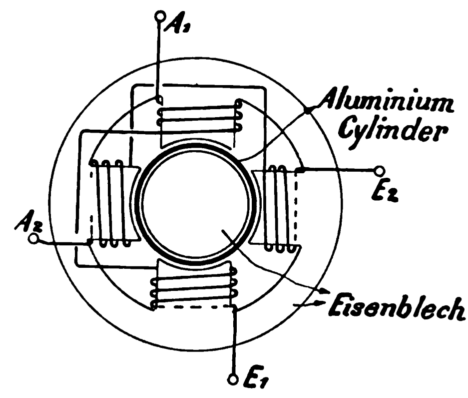


Abbildung 13. Schematische Darstellung des Systems eines Ferraris-Instruments.

Ferraris-Instrumente. Durch „magnetische Wechselfelder" kann man in drehbar gelagerten Spulen, die sich sogar auf einfache Kupfer- oder Aluminiumscheiben oder -zylinder zurückführen lassen, solche Ströme induzieren, daß diese mit den magnetischen Wechselfeldern zusammen ein Drehmoment in den betreffenden Scheiben oder drehbaren Spulen erzeugen. Diese Entdeckung machte der Italiener Ferraris, nach dem die betreffenden Wechselstrominstrumente ihren Namen haben; im Maschinenbau führt dasselbe Prinzip zu den Induktions- oder Drehfeldmotoren. Ein einziger Wechselstrom, der auch nur ein Wechselfeld hervorruft, erzeugt freilich auch Ströme in der Scheibe, wie in den Wicklungen eines Transformators; aber ein Drehmoment kommt nicht zustande. Man muß in einer zweiten Spule oder mehreren anderen Spulen Ströme fließen lassen, die in der Phase verschoben sind. Eine solche Phasenverschiebung ist aber, wie wir gesehen haben, durch Einschalten von „Selbstinduktionsspulen" möglich. Es fließe beispielsweise in zwei sich gegenüberliegenden Spulen der Abbildung 13, 14 oder 15 ein Strom proportional der Spannung, indem man sie nur mittels eines Drahtes von hohem Widerstand an die Klemmspannung legt; verbindet man dagegen die zwei anderen durch eine besondere Spule mit starkem Magnetfeld (eine Selbstinduktionsspule) mit denselben Spannungsklemmen, so fließt in diesen ein Strom, der auch proportional der Spannung, aber in der Phase gegen den ersten verschoben ist. Im


Abbildung 14. System eines Ferraris-Instruments von Siemens & Halske unter Entfernung der Dämpfungsmagnete.

Raume zwischen den Spulen werden alsdann in ihrer Phase nun ebenfalls gegeneinander verschobene Magnetfelder erzeugt, und in dem Aluminiumzylinder entstehen Ströme, die mit den Feldern ein Drehmoment ergeben. Da sich nach dem Gesetz von der Erhaltung der Energie nur bei Änderung der Energie des Magnetfeldes Ströme induzieren lassen, d. h. auf den Aluminiumzylinder elektrische Energie übertragen läßt, so ist anderseits die Größe der übertragenen Energie auch naturgemäß von der Größe dieser Änderung abhängig: je rascher die Energie des magnetischen Feldes ab- und zunimmt, je größer also die Periodenzahl des Wechselstroms ist, desto mehr Energie kann auch durch die Erscheinung der Induktion von dem einen Leiter auf einen anderen, hier also auf den Aluminiumzylinder, übertragen werden. Die Angaben der Ferraris-Instrumente sind daher von der Periodenzahl abhängig. Bei Gleichstrom, der keine Energie durch Induktion übertragen kann, zeigen die Instrumente selbstverständlich nicht an. Auch Leistungsmesser oder Wattmeter werden vielfach nach dem Ferraris-Prinzip gebaut. Es genügt dazu nicht, nur das eine Spulenpaar der Abbildung 13 von einem Strom durchfließen zu lassen, der proportional und phasengleich mit der Netzspannung ist, das andere Spulenpaar dagegen von einem Strom, der proportional und phasengleich mit dem Netzstrom ist, wie das beim dynamometrischen Wattmeter der Fall war. Denn dann würden bei Phasengleichheit von Netzspannung und Netzstrom, also wenn die zu messende Leistung am größten ist (Abbildung 12), auch die Ströme im Instrument phasengleich sein, zu gleicher Zeit ihre Maximal- und Minimalwerte haben. Alsdann aber würde, wie wir schon festgestellt haben, ein Drehmoment nicht ausgeübt werden. Es ist notwendig, durch besondere Anordnungen, für die eine Menge Konstruktionen und Patente vorliegen, den einen Strom im Instrument künstlich gegen den anderen in der Phase zu verschieben, derart daß, wenn Strom und Spannung im Netz phasengleich sind, der eine Strom im Instrument gerade seinen Nullwert besitzt, wenn der andere sein Maximum hat. Dann erst ist das Drehmoment in diesen Ferraris-Wattmetern proportional der Leistung, selbst wenn im Netz auch eine Phasenverschiebung des Stromes gegen die Spannung eintritt.



Abbildung 15. Ferraris-Instrument von Siemens & Halske ohne Gehäuse und Skala, aber mit Dämpfungsmagneten und Vorschaltwiderstand.

DER DREHSTROM UND SEINE MESSUNG. Unter Drehstrom versteht man 3 Wechselströme, die um gleich viel zeitlich gegeneinander verschoben sind, so daß in gleichen Zeitintervallen ein Strom nach dem anderen seinen Maximalwert erreicht, wie es aus Abbildung 16 zu ersehen ist. Die direkte Erzeugung dreier derartiger Ströme in besonderen Maschinen ergibt den Vorteil, daß man sie durch geeignet angeordnete Spulen von Apparaten oder Motoren fließen lassen kann und alsdann in Kupferzylindern, Aluminiumscheiben, aber auch in den Ankerwicklungen der Motoren ohne weiteres Drehmomente erhält, daß also die künstliche Phasenverschiebung, wie sie oben bei Wechselstrom geschildert wurde, unnötig ist. Ordnet man 3 Spulen in den Nuten eines Eisenringes nach Abbildung 17 an, und schickt man durch je eine Spule je einen Strom der Abbildung 16, so würde jede Spule für sich allein ein magnetisches Wechselfeld erzeugen, das mit der Zeit seine Größe und Richtung ändert; alle drei zusammen erzeugen aber ein einziges magnetisches Feld von konstanter

Gestalt, das sich nur mit einer konstanten Winkelgeschwindigkeit fortwährend im Raume dreht (Drehfeld). Dieses sucht z. B. einen Aluminiumzylinder, der in den Luft-

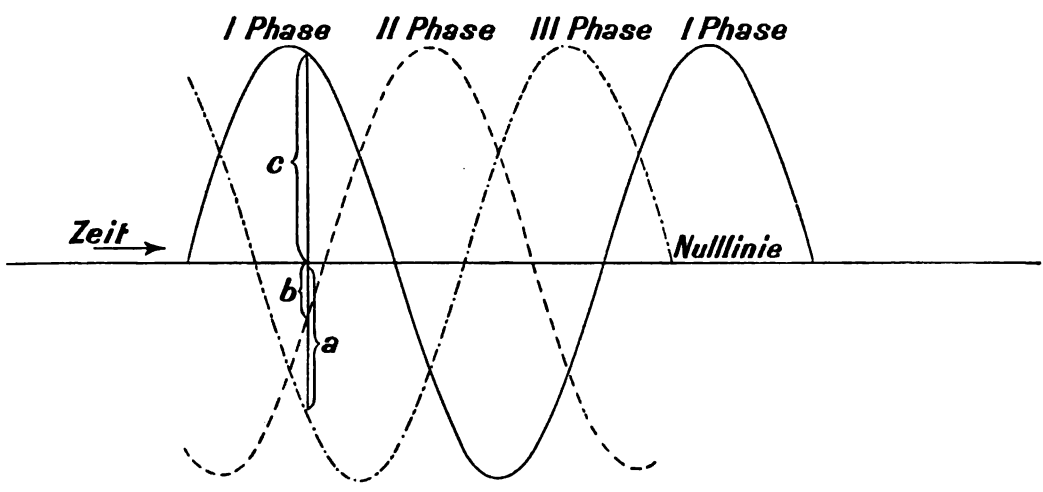
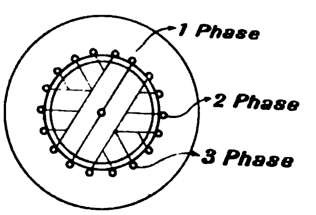


Abbildung 16. Dreiphasen- oder Drehstromkurven oder auch Kurven der zugehörigen Spannungen.

raum der Abbild. 17 eingebracht wird, mit sich zu nehmen; dies ist auch das Prinzip der asynchronen Drehstrommotoren, das genauer bei der Besprechung dieser Motoren erläutert wird. Der Vorteil des Drehstroms gegenüber dem Wechselstrom besteht daher in der einfacheren Erzeugung eines mechanischen Drehmoments, während die einzelnen Wechselströme, aus denen er in Wirklichkeit besteht, genau so gut zu transformieren sind wie einfacher Wechselstrom. Man braucht aber für die 3 Ströme, wenn sie z. B. der Abbild. 16 entsprechen, nur 3 Leitungen, da, wie ersichtlich, bei einer derartigen Phasenverschiebung stets eine Leitung die Elektrizität zurückführen kann, die die beiden anderen Leitungen zuführen (a + b = c). Drehstrom wird bekanntlich erzeugt in einer einzigen Maschine, der Drehstromdynamo, mit 3 Wicklungen, in denen, wie bei der Besprechung dieser Maschinen auf S. 272 dargestellt wird, 3 gleiche phasenverschobene Spannungen erzeugt oder induziert werden. Übrigens werden die Wicklungen und Leitungen der 3 „Zweige" selbst auch häufig fälschlich „Phasen" genannt, z. B. spricht man von den 3 primären und den 3 sekundären „Phasen" eines Drehstromtransformators, weil in diesen Wicklungen 3 phasenverschobene Ströme fließen. Nun sind zwei Schaltungen bei Drehstrom möglich. Die 3 Wicklungen, die wie bei einer Drehstromdynamo auch bei einem Drehstrommotor vorhanden sind, können einerseits in einem Punkt vereinigt werden und durch die 3 freien Enden die 3 Wechselströme zugeführt werden, da ja die Summe der drei



Abbild. 17. Entstehung eines Drehfeldes.

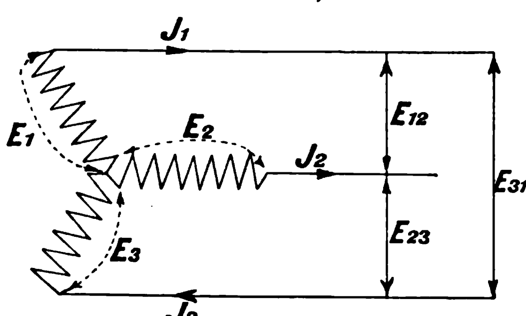


Abbildung 18. Sternschaltung bei Drehstrom.

gleichen Ströme jederzeit Null ist. Man stellt die Schaltung eines solchen Generators oder Motors alsdann durch Abbildung 18 dar und spricht von Sternschaltung. Die 3 Ströme sind also in den 3 Leitungen meßbar. Außer den 3 Spannungen an jeder Wicklung (Phasenspannung genannt) sind noch 3 Spannungen E_{12}, E_{23} und E_{31} zu messen. Man nennt sie die 3 „verketteten Spannungen", die wegen der Phasenverschiebung der 3 „Phasenspannungen" gegeneinander ebensowenig gleich der Summe zweier von ihnen zu sein brauchen, wie die Leistung bei Wechselstrom gleich dem Produkt aus Strom und Spannung zu sein braucht, sie sind vielmehr 1,73mal so groß wie die Phasenspannungen. Die Leistung, die etwa in Wicklung 1 der Abbildung 19 zugeführt wird, kann dadurch gemessen werden, daß man durch die feste Spule eines gewöhnlichen Wattmeters den Strom 1 schickt und seine bewegliche Spule an die Klemmen 1—0 legt; geradeso kann man in den beiden anderen Zweigen verfahren. Die Theorie zeigt aber, daß man außer der Summe dreier solcher Ablesungen die gesamte Leistung bei Drehstrom auch dadurch messen kann, daß man nur 2 Wattmeter in besonderer Weise schaltet — 2-Wattmeter-Methode (Abbildung 19). Die 2 Stromspulen werden in 2 Zweigen etwa in 1 und 3 eingeschaltet, die Spannungsspulen aber mit den Klemmen 1 und 3 einerseits, anderseits mit der nicht benutzten Klemme 2 verbunden. Die Summe beider Wattmeterablesungen ergibt die Gesamtleistung in allen drei Zweigen bei beliebiger Belastung und Phasenverschiebung. Auch Glühlampen schaltet man bisweilen in Sternschaltung. Sind in jedem Zweig aber nicht gleich viele eingeschaltet, so daß die Ströme ungleich werden, so ist eine besondere vierte Rückleitung (Nulleiter) zwischen dem Sternpunkte der Dynamo und dem der Lampen zu verlegen. Die zweite Schaltung ergibt sich, wenn wir die 3 Wicklungen z. B. eines Motors zyklisch Anfang mit Ende verbinden und an den 3 Verbindungspunkten die 3 Leitungen des Netzes anschließen: Dreieckschaltung (Abbildung 20). Wir haben nur noch 3 Spannungen, dagegen außer den 3 Strömen in den Zuleitungen noch 3 andere Ströme in den Wicklungen, die wir aber im allgemeinen nicht mehr messen können, da die Zweige schon innerhalb der Maschine verbunden sind. Ebensowenig können wir dann die 3 Leistungen in den 3 Zweigen einzeln messen. Auch hier führt aber die 2 Wattmetermethode, ganz genau so ausgeführt wie oben beschrieben, zum Ziel.

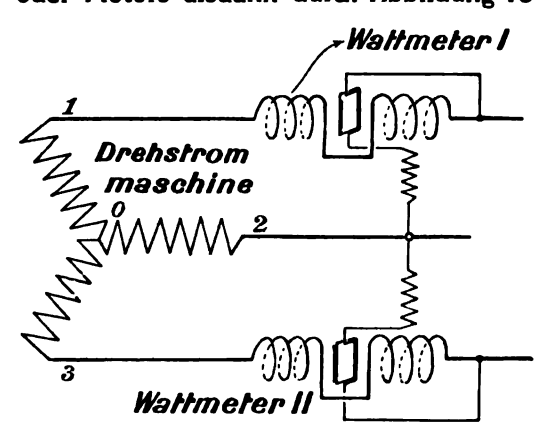


Abbildung 19. Schaltung nach der 2-Wattmeter-Methode bei Sternschaltung.

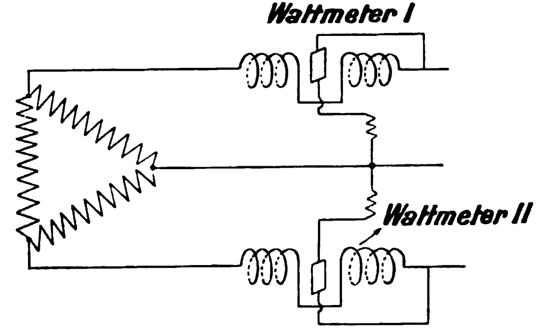


Abbildung 20. Anwendung der 2-Wattmeter-Methode bei Dreieckschaltung.

REGISTRIERENDE INSTRUMENTE. Zur Kontrolle des Betriebes kann es erwünscht sein, die Änderungen der Spannung, des Stromes und der Leistung zu registrieren, d. h. bei Wechselstrom sind die langsamen Änderungen der Effektivwerte bei

Schwankungen der Belastung, nicht etwa die raschen der Momentanwerte gemeint. In derartigen Instrumenten ist meist die mechanische Aufgabe gelöst, die drehende Bewegung der im vorigen beschriebenen Zeigerinstrumente in eine geradlinige zu verwandeln, die Zeiger mit einem Schreibstift zu versehen und einen Papierstreifen durch ein Uhrwerk unter diesem Schreibstift durchtreiben zu lassen. Ältere Instrumente haben auch noch die drehende Bewegung der Zeigerinstrumente beibehalten, das bewegte Papier erhält dann kreisförmige Koordinaten. Nur bei den Instrumenten der ersten Konstruktion kann man aber z. B. bei den registrierenden Wattmetern die ganze geleistete Arbeit in Wattstunden, also Watt mal Zeit, durch einfaches Planimetrieren erhalten. Außer in den Zentralen findet man diese Instrumente nicht.

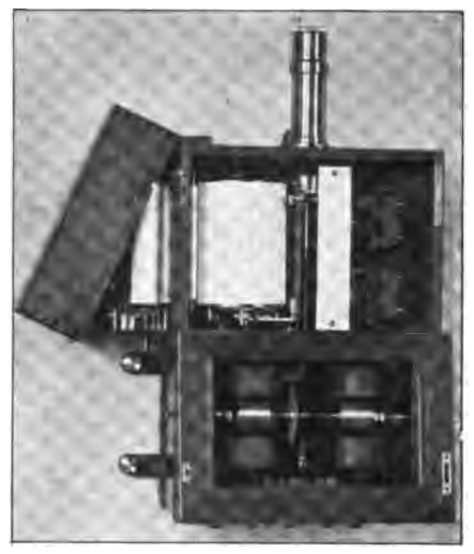


Abbildung 21. Registrierendes Wattmeter der Hartmann & Braun A.-G. Frankfurt a. M., für Drehstrom mit beliebig belasteten Zweigen. Das Instrument enthält unten 2 Ferraris-Systeme, die nach der 2-Wattmeter-Methode geschaltet sind. Die Drehung der Achse mit den beiden Aluminiumzylindern wird mit Hebelübersetzung durch einen Kokonfaden auf einen Schreibstift übertragen gegen die Kraft einer Feder. Die Bewegung der Achse wird dadurch gedämpft, daß sich eine auf ihr sitzende Aluminiumscheibe zwischen den Polen eines permanenten Magneten hindurchbewegen muß.

Neuerdings registriert man auch die raschen Änderungen des Wechselstroms (von 50 Perioden pro Sekunde) in den sogenannten Oszillographen, so daß man die elektrischen Vorgänge bis in die feinsten Einzelheiten verfolgen kann; diese Apparate besitzen daher eine außerordentlich große wissenschaftliche Bedeutung für Wechselstromvorgänge.

ZÄHLER: Von äußerster ökonomischer Bedeutung sind dagegen die Elektrizitätszähler, welche die verbrauchte elektrische Energie zählen sollen, ohne sie im einzelnen zu registrieren. Soll doch nach ihnen die elektrische Energie gekauft und verkauft werden. Nach gesetzlicher Vorschrift sollen die Zähler daher in Kilowattstunden geeicht sein.

Die Forderungen an einen guten Zähler sind:

- Genauigkeit bei Entnahme von normalen, aber auch von geringen Elektrizitätsmengen.
- Geringer Eigenverbrauch an Energie.
- Unabhängigkeit von der Länge der Gebrauchsdauer.
- Unempfindlichkeit gegen Stöße beim Transport und gegen ungenaue Aufhängung.
- Unempfindlichkeit gegen Temperaturschwankungen.

Bei Wechselstromzählern kommt noch hinzu:

- Richtige Angaben auch bei großen Phasenverschiebungen.
- Unabhängigkeit von der Kurvenform der Spannung und des Stroms.
- Angabe der Periodenzahl, für die der Zähler geeicht ist.

Über die Genauigkeit unserer heutigen elektrischen Zähler herrschen vielfach noch falsche Begriffe.

Nach den Vorschriften der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt darf der Fehler eines elektrischen Zählers betragen:

Belastung in %	Gleichstromzähler	Wechselstromzähler oder Drehstromzähler (Spannung u. Strom gleich in allen 3 Phasen)				Drehstromzähler (Strom in einem Zweige unterbrochen)			
		$\cos \varphi = 1$	$\cos \varphi = 0{,}8$	$\cos \varphi = 0{,}5$	$\cos \varphi = 0{,}1$	$\cos \varphi = 1$	$\cos \varphi = 0{,}8$	$\cos \varphi = 0{,}5$	$\cos \varphi = 0{,}1$
100	3,30 %	3,30	4,88	7,06	25,81	3,52	5,15	7,50	28,09
80	3,38	3,38	4,97	7,21	26,64	3,65	5,31	7,76	29,38
60	3,50	3.50	5,13	7,46	27,89	3,87	5,58	—	—
40	3,75	3.75	5,44	7,96	30,39	4,30	6,12	—	—
20	4,5	4,50	6,37	9,46	37,89	5 60	7,75	—	—
10	6,0	6,00	8,25	12,46	52,89	8,20	11,0	16,84	74,85
4	25	25,0							

Ein Gleichstromzähler, der für einen normalen Verbrauch von 100 Kilowatt gebaut ist, darf hiernach 5 Kilowattstunden anzeigen, wenn auch nur 4 KW eine Stunde lang hindurchgegangen sind, oder auch 3 KW-Stunden.

Nicht alle Zähler, auf deren Zifferblatt man die verbrauchten Kilowattstunden ablesen kann (meist auch noch die Zehntel, die Hektowattstunden), sind wirklich Wattstundenzähler. Manches Zählwerk zeigt eigentlich nur an, wieviel Ampere wieviel Stunden lang hindurchgegangen sind, man nennt sie Amperestundenzähler. Setzt man aber voraus, daß die Netzspannung stets dieselbe ist und die betreffenden Zähler nur für ein bestimmtes Netz etwa von 110 oder 220 Volt gebraucht werden, so können die Angaben des Amperestundenzählers ein für allemal mit der konstanten Spannung multipliziert, d. h. der Zähler gleich als Wattstundenzähler geeicht werden. Wenn daher ihre Angaben über die verbrauchte Energie bei jeder Schwankung der Netzspannung natürlich auch verkehrt sind, so wird das doch von vielen Elektrizitätswerken und Konsumenten in den Kauf genommen, da die Zähler billiger sind und man annehmen kann, daß die Fehler durch zu hohe und zu niedrige Spannung sich mit der Zeit ausgleichen. Ein von mehreren Firmen gebauter Amperestundenzähler für Gleichstrom ist aus dem Präzisions- oder Drehspulinstrument entwickelt. Läßt man die Feder in Abbildung 1b fort, so wird die Spule in eine rotierende Bewegung geraten können. Würde man freilich den Strom nur durch flexible Drähte zuführen, so würde sie sich nur aus dem starken Felde des Magneten herausdrehen und dann stehenbleiben. Erst wenn man mehrere Spulen nimmt und durch Bürsten und einen kleinen „Kommutator“ (Abbildung 22) erst der einen Spule Strom zuführt, dann der nächsten, wenn sich die erste aus dem Felde herausgedreht hat usw., schließlich wieder der ersten, aber in umgekehrter Richtung, wenn die Spulenseiten ihre Lage gegen die Anfangsstellung vertauscht haben — erst dann wird es möglich sein, eine dauernde Drehung durch den hindurchgehenden Strom zu erhalten. Man nimmt praktisch nicht den ganzen Netzstrom, sondern zweigt einen kleinen Teil des Netzstroms an einem Widerstand, in diesem Falle auch Shunt



Abbildung 22. Amperestundenzähler der Danubiawerke, jedoch geeicht nach KW-Stunden. Unten der Kommutator; der permanente Magnet hüllt den Anker fast ein.

genannt, ab, geradeso, wie dies für Amperemeter für stärkere Ströme üblich ist, vgl. Abbild. 1. Aber erst ganz besondere Überlegungen und Anordnungen werden es möglich machen, daß die eintretende Umdrehungsgeschwindigkeit wirklich nur proportional dem hindurchgehenden Strom und unabhängig von der Reibung ist; dann erst ist durch einfachen Antrieb des Zählwerks von der Spulenspindel aus das Problem des Amperestundenzählers gelöst. Solche Lösungen liegen z. B. von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft und den Danubiawerken vor.



Abbildung 23. Ansicht eines elektrolytischen „Stia"-Zählers von Schott & Genossen, Jena.

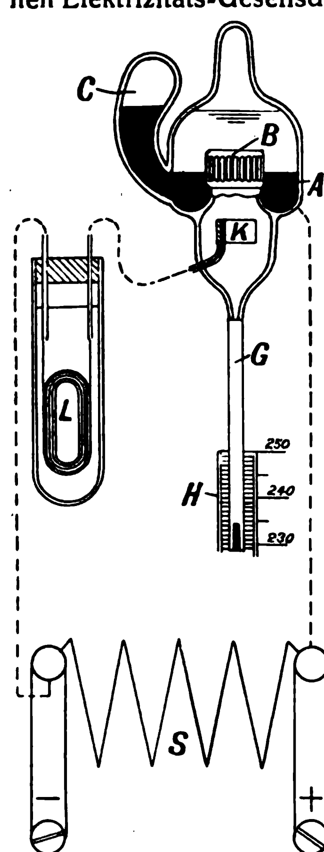


Abbildung 24. Schaltung des Stia-Zählers: Der Strom geht im Nebenschluß zum Widerstand S (Shunt) vom Quecksilberpol A durch den Elektrolyten hindurch zum anderen Pol aus Iridium K. Die Glasstäbchen B verhindern ein Übertreten von Quecksilber. Das an K ausgeschiedene Quecksilber wird in dem Rohre G gesammelt und an der Skala H direkt in Ampere- oder Kilowattstunden abgelesen. C enthält den Vorrat an Quecksilber und L ist ein vorgeschalteter besonderer Widerstand, der notwendig ist, soll der Zähler bei den verschiedensten Temperaturen richtig zeigen.

Als Amperestundenzähler für Gleichstrom eignet sich ferner sehr gut ein elektrolytischer Zähler, bei dem die Umsetzung der elektrischen Energie in chemische benutzt wird. Er wird bei normaler, aber auch der allergeringsten Stromstärke mit großer Genauigkeit zeigen. Es ist ja die aus einer Metallsalzlösung abgeschiedene Metallmenge direkt proportional der Stromstärke. Als sich Edison in den siebziger Jahren des vorigen Jahrhunderts der Verteilung elektrischer Energie zuerst in größerem Maßstabe in Amerika widmete (nach Erfindung der Kohlefadenglühlampe), erbaute er auch auf diesem Prinzip den ersten Elektrizitätszähler als Amperestundenzähler. Die niedergeschlagene Metallmenge wurde automatisch gewogen und registriert. Durch automatische Umkehrung des Stromes bei gleichmäßig fortschreitender Registrierung sollte ein kleines Quantum Elektrolyt für alle Zeit ausreichen. Zersetzen oder Austrocknen des Elektrolyten, Einfrieren, Beeinflussung durch Temperaturschwankungen und andere Übelstände ließen den Zähler bald als veraltet erscheinen. Vor einigen Jahren tauchte wieder ein elektrolytischer Zähler auf dem Markte auf, doch war nun die elektrolytische Flüssigkeit vollständig hermetisch in Glas eingeschlossen. Trotzdem zersetzte sie sich (Quecksilbernitrat) mit der Zeit, auch dieser Zähler wurde unbrauchbar. Der Fehler lag am Glase, das auf den Elektrolyten chemisch einwirkte; erst neueren Untersuchungen gelang es, ein passendes Glas, Elektrolyten und Konstruktion zu finden (Stiazähler). Der große Vorteil elektrolytischer Zähler für Elektrizitätswerke ist der, daß sie auch bei kleinsten Entnahmen des Konsumenten mit 2—4 % Genauigkeit anzeigen, während andere



Abb. 25. Einfacher älterer Wattstundenzähler von H. Aron, Charlottenburg.

Zähler bis zu 25% Fehler bei einer Entnahme von 4% der normalen besitzen dürfen und häufig auch gerade zum Schaden der Elektrizitätswerke besitzen.

Ein konstruktiv recht eigenartiger Zähler, der sowohl als Ampere- wie als Wattstundenzähler für Gleich- wie für Wechsel- und Mehrphasenstrom ausgeführt wird, ist der **Pendelzähler** von **H. Aron**. In seiner einfachsten Ausführung hat er zum Gebrauch als Wattstundenzähler folgende Gestalt: zwei Pendel werden durch ein Uhrwerk, das von Hand oder automatisch aufgezogen werden mag, in Schwingungen versetzt (Abbildung 25). Die Schwingungsdauer beider Pendel ist zunächst genau gleich. Das Gewicht des einen ist aber durch eine Spule mit vielen Windungen ersetzt, während in der Mitte unter ihm eine zweite feste Spule mit dicken Windungen angebracht ist. Wird die letztere von dem Netzstrom oder einem ihm stets proportionalen Teile durchflossen, die Spule am Pendel von einem Strom proportional der Spannung, was durch Vorschalten von Widerstand leicht zu erreichen ist, so tritt eine Verzögerung oder Beschleunigung der Schwingungsdauer dieses Pendels ein. Die Theorie ergibt, daß die Differenz der Geschwindigkeiten beider Pendel fast genau proportional der Leistung im Stromkreise ist. Gelingt es also, die Differenz der Schwingungen auf ein Zählwerk zu übertragen, so haben wir einen Wattstundenzähler vor uns. Diese mechanische Aufgabe löst das Planetengetriebe. Die Verbesserungen der heutigen Aronzähler diesem Grundprinzip gegenüber liegen in einer noch größeren Annäherung an die verlangte genaue Proportionalität der Angaben des Instruments mit der Leistung, automatischem elektrischem Aufzug des Uhrwerks, der Ausschaltung jeden Fehlers, der aus einer ungleichen Schwingungsdauer beider Pendel bei Stromlosigkeit resultieren könnte, Anpassung des Systems an die Anforderungen der Mehrphasennetze u. dgl. mehr. Die Aronzähler gehören heute zu den zuverlässigsten, aber auch zu den teuersten Zählersystemen, doch zeigen auch sie bei rauhem Transport oft an Ort und Stelle nicht mehr dieselbe Genauigkeit wie bei der Eichung.

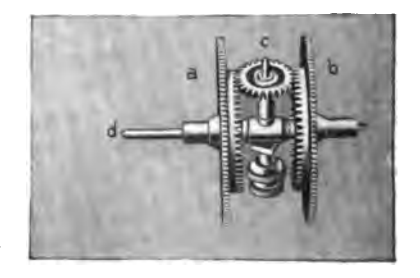
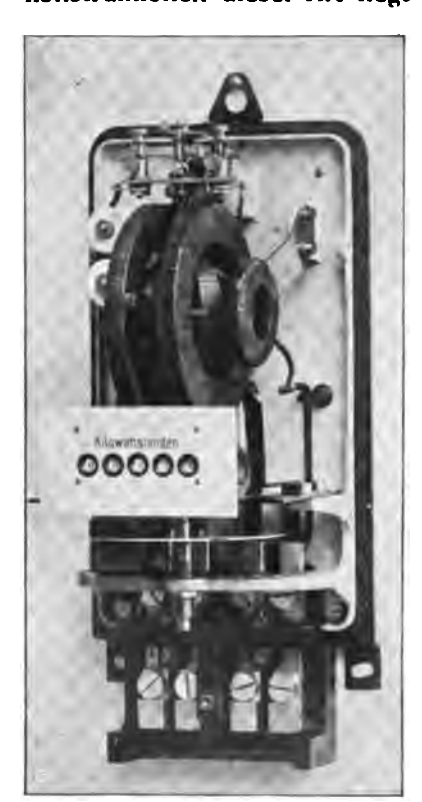


Abbildung 26. Planetenradgetriebe: Werden die auf Achse d lose sitzenden Räder a und b im entgegengesetzten Sinne gleich rasch angetrieben, so bleibt das Rädchen c im Raume stillstehen und dreht sich nur um seine eigene Achse. Bei verschiedener Geschwindigkeit von a und b rollt es sich auf ihnen ab und dreht dadurch die Welle d entsprechend der Differenz der Umdrehungszahlen von a und b.

Als Wattstundenzähler sind ihrer Verbreitung nach vor allen anderen die sogenannten **Motorzähler** mit Kommutator für Gleich- und Wechselstrom zu nennen. Sie werden von einer sehr großen Zahl von Firmen gebaut. Wie aus dem Präzisionsinstrument der Amperestundenzähler mit permanentem Magneten, so kann aus dem dynamometrischen Wattmeter der Motorzähler abgeleitet werden. Ein möglichst gleichmäßiges Feld wird durch eine feste, vom Netzstrom durchflossene Spule gebildet. Statt einer beweglichen Spule beim Dynamometer sind wieder mehrere vorhanden, deren Enden an einen Kommutator führen. Eine nach der anderen wird von einem Strom proportional der Netzspannung durchflossen, ja, statt der einzelnen Spulen

kann auch eine kleine in sich geschlossene Ankerwicklung, nur ohne Eisen, verwendet werden. Der Anker wird in Rotation geraten, wobei das Drehmoment proportional der Leistung ist, wie ohne weiteres aus dem Prinzip des Wattmeters hervorgeht. Wieder ist aber die Forderung aufzustellen, daß sich aber auch die Tourenzahl proportional dieser Leistung einstellt, soll das Zählwerk Leistung mal Zeit zählen. Die Forderung kann dadurch erfüllt werden, daß man ein passendes Gegendrehmoment einführt, das proportional der Geschwindigkeit wächst. Das ist nun tatsächlich vorhanden, wenn man eine Metall-, am besten Kupfer- oder Aluminiumscheibe auf der Achse anbringt und sie sich durch das Feld eines permanenten Magneten hindurchbewegen läßt. Infolgedessen sehen wir in fast allen Motorzählern diese Anordnung, z. B. in Abbildung 28. Die Entwicklung der Zählerkonstruktionen dieser Art liegt in ihrer immer größeren Genauigkeit, Verminderung des Einflusses der Reibung, obgleich die Achsen der Zähler schon längst zwischen Steinen liefen, die Kommutatoren aus Silber hergestellt wurden, ebenso die Bürsten, die dazu noch hochkant auf dem Kommutator aufruhten, so daß die Berührung fast eine punktförmige war. Und doch zeigen die im Betrieb befindlichen Zähler häufig nach einiger Zeit Ungenauigkeiten. Zähler mit weichen Eisenkernen wurden auch gebaut, haben aber ihre Bedeutung mehr und mehr verloren, was aus den Bemerkungen über die Weicheiseninstrumente leicht verständlich ist.


Abb. 27. Neuerer Aronzähler mit Doppelpendel für Dreileiter- oder Drehstromnetze, Umschaltung und elektrischem Aufzug des Gangwerks, geöffnet.


Abb. 28. Motorzähler der Siemens-Schuckert-Werke, Berlin. Kommutator und Bürsten oberhalb der Feldspulen und des Ankers. Kleine Spule rechts zur Kompensierung der Reibung. Unterhalb des Zählwerks die Bremsscheibe zwischen permanenten Magneten.

Für Wechselstrom entsprechen den Ferraris-Instrumenten die Induktionszähler, die wieder aus Abbildung 13 bis 15 ohne weiteres hervorgehen, wenn man die Feder wegläßt, die dort das Gegendrehmoment ausübt. Natürlich hat man aber wieder wie beim Motorzähler ein anderes Gegendrehmoment einzuführen, das bei einer bestimmten Leistung auch nur eine bestimmte Tourenzahl, und zwar ihr proportional, gestattet. Wieder eignet sich dazu das Drehmoment, das auf eine Metallscheibe in einem permanenten Magnetfeld ausgeübt wird. Da aber eine Metallscheibe oder ein Metallzylinder aus Kupfer oder Aluminium wegen der Induktionswirkung schon vorhanden ist, so

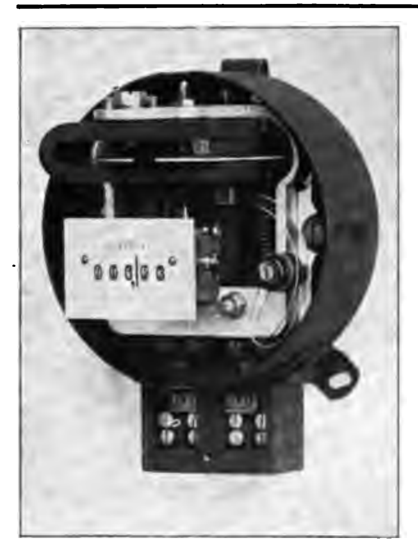
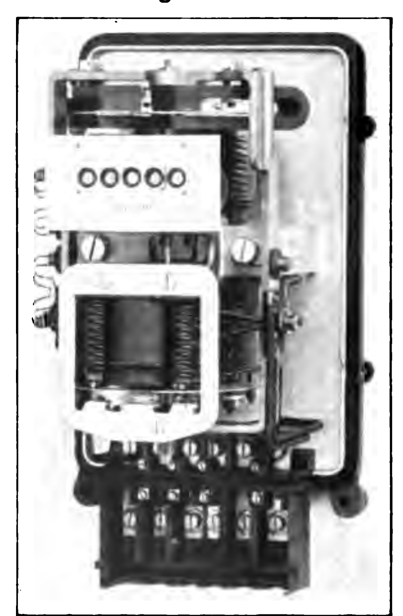


Abbildung 29. Wechselstrom-Wattstundenzähler der Siemens-Schuckert-Werke, Berlin. Die Aluminiumscheibe, die oberhalb des Zählwerks als weißer Strich sichtbar ist, befindet sich hinten unter dem Einfluß zweier phasenverschobener Wechselfelder, vorn im Felde eines bremsenden permanenten Magneten.

braucht nur ein permanenter Magnet wie in Abbildung 28 an dieser angebracht zu werden. Die verschiedenen Konstruktionen unterscheiden sich hauptsächlich in der Form der Magnetfelder, z. B. Abbildung 29, und der Vorrichtung zu einer derartigen Phasenverschiebung der Ströme, wie sie bei der Beschreibung der Ferraris-Wattmeter geschildert wurde. Sie werden den Motorzählern bei Wechselstrom wegen größerer Einfachheit und wegen des Fortfalls des Kommutators vielfach vorgezogen. Auch diese Zähler können für Drehstromnetze gebaut werden, doch genügt es, 2 Systeme für einfachen Wechselstrom auf einer Achse zu vereinigen, da man diese dann nach der 2-Wattmeter-Methode schalten und damit ein Drehmoment auf die Achse erhalten kann, das dem ganzen Energieverbrauch im Drehstromnetz proportional ist (Abbildung 30).

EICHUNG DER INSTRUMENTE. Alle technischen Instrumente müssen geeicht werden. Praktisch vergleicht man sie zunächst mit anderen, die als richtig bekannt sind. Aber auch diese müssen von Zeit zu Zeit nachgeeicht und dann doch auf die Grundeinheiten zurückgeführt werden. Das geschieht durch die Prüfämter und durch die Physikalisch-Technische Reichsanstalt. Während nun durch Reichsgesetz das Ampere als diejenige Stromstärke definiert ist, die aus einer Silbernitratlösung pro Sekunde 1,118 mg Silber ausscheidet, als Einheit des Widerstandes der einer Quecksilbersäule von 1 qmm Querschnitt und 106,3 cm Länge bei 0°, während die Einheit der Spannung aus dem Produkt beider nach dem Ohmschen Gesetze ohne weiteres folgt, so geht die Physikalisch-Technische Reichsanstalt bei ihren Instrumenteneichungen einerseits von Manganin-Normalwiderständen aus, welche mit der gesetzlichen Einheit verglichen sind, anderseits von Normalelementen, z. B. dem Cadmium-Normalelement, die jederzeit, wenn stromlos, dieselbe Spannung behalten. Nach besonderen Methoden werden nach solchen bekannten Widerständen und Gleichstromspannungen alle Gleichstrominstrumente und dann weiter die Gleichstromzähler geeicht. Schwieriger liegt die Frage bei den Wechselstrominstrumenten und -zählern. Hier werden sowohl Hitzdrahtinstrumente wie Dynamometer und neuerdings von der Reichsanstalt auch Elektrometer mit Gleichstrom geeicht und Vorsichtsmaßregeln getroffen, daß sie auch bei Wechselströmen oder -spannungen richtig zeigen. Einheitlichkeit auf diesem Gebiete wird erst die Zukunft bringen.



Abbild. 30. Zähler nach dem Ferraris-Prinzip für beliebige Drehstromnetze, Ausführung der Siemens-Schuckert-Werke, Berlin; er entsteht durch Verdoppelung des vorigen und Schaltung der Spulen nach der 2-Wattmeter-Methode. Bremsmagnete oben.

2. DIE ELEKTRISCHEN MASCHINEN

DIE HEUTIGEN VORSTELLUNGEN VON DEN PRINZIPIEN DER ENERGIEUMSETZUNG IN ELEKTRISCHEN MASCHINEN. Die Kräfte oder die Prinzipien der Energieumsetzung, die wir bei der Behandlung der Meßinstrumente kennen lernten und die auch im Elektromaschinenbau das Fundament aller Konstruktionen bilden, sollen hier noch einmal übersichtlich zusammengestellt werden.

Es sind für Gleichstrom:

I. Die Kraft, die ein von Gleichstrom durchflossener Leiter in einem magnetischen, stets gleichgerichteten Felde erfährt; sie wirkt im Drehspulinstrument wie im Gleichstrommotor.

II. Die Anziehung eines Stückes weichen Eisens durch einen Magneten oder das Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule. Dies Prinzip finden wir sowohl in den Weicheiseninstrumenten wie in den Hub- und Bremsmagneten.

Für Wechselstrom:

I. Die Kraft, die ein von Wechselstrom durchflossener Leiter in einem magnetischen Wechselfeld erfährt. Wir können uns durch die Betrachtung dieser Kraft vom Dynamometer zum Wechselstromkommutatormotor führen lassen.

II. Die Umsetzung elektrischer Energie durch die Induktion magnetischer Wechselfelder, einmal zur Transformierung elektrischer Energie in feststehenden Wicklungen der Transformatoren, anderseits zur Umwandlung in mechanische Energie in den Ferrarisinstrumenten oder den Induktionsmotoren.

III. Die Anziehung weicher Eisenstücke durch magnetische Wechselfelder, die zu denselben Zwecken wie bei Gleichstrom ausgenutzt wird.

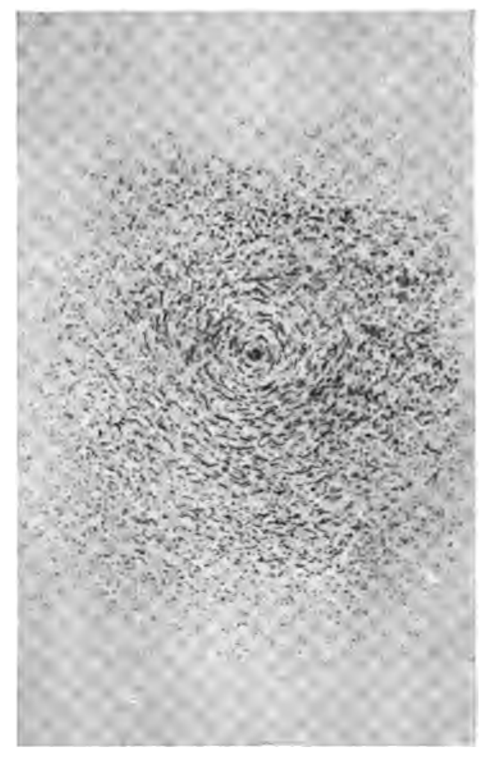


Abbildung 31. Magnetische Kraftlinienverteilung in konzentrischen Kreisen um einen geraden stromdurchflossenen Leiter, der senkrecht zur Papierebene in der Mitte zu denken ist.

Die elektrostatischen Kräfte kommen, weil zu klein, im Maschinenbau nicht in Betracht,* wie sie auch in der Meßtechnik eine untergeordnete Rolle spielen, ebensowenig natürlich die chemischen Wirkungen.

Die Wärmewirkungen, die man in den Hitzdrahtinstrumenten kennen lernte, spielen im Elektromaschinenbau die Rolle eines notwendigen Übels.

* In den physikalischen Lehrbüchern wird außer den Gesetzen von den magnetischen Feldern, der magnetischen „Induktion“, der Einfluß von „Kondensatoren“, z. B. Leidener Flaschen, behandelt, die je nach ihrer „Kapazität“ Elektrizitätsmengen, d. h. auch wieder Energie in sich aufnehmen können. So interessant die Vorgänge in Stromkreisen mit solchen Kondensatoren eventuell sein können, für das Verständnis der normalen elektrischen Starkstromtechnik ist ihre Kenntnis entbehrlich, da die Erscheinungen hier mit verschwindenden Ausnahmen höchstens als Störungen betrachtet werden. Ganz anders in der Technik der raschen elektrischen Schwingungen, der drahtlosen Telegraphie, wo die Kondensatoren einen wesentlichen Bestandteil der Anordnung bilden. Der Laie hat von den Kondensatoren, in denen elektrische Energie als solche aber nur in geringer Menge aufgespeichert werden kann, scharf die Akkumulatoren zu unterscheiden, in denen nicht elektrische Energie selbst, sondern nur umgewandelt in die Form chemischer Energie in beliebig großer Menge angesammelt wird.

Zu der obigen Zusammenstellung ist nur der eine Satz hinzuzusetzen, daß, wie schon an andrer Stelle dieses Werkes erwähnt, alle obengenannten Arten der Energieumsetzung umkehrbarer Natur sind, d. h. man kann aus jeder Maschine, die elektromagnetische Energie in mechanische umsetzt, also aus jedem Elektromotor, auch eine Spenderin elektrischer Energie aus mechanischer, d. h. eine Dynamo entwickeln. Allgemein bekannt sind bisher nur diejenigen Dynamos, in denen metallische Leiter unter Aufwendung mechanischer Kraft an magnetischen Polen vorbeigezogen werden. Aber schon hier möge kurz erwähnt werden, daß neuerdings auch die Wechselstromkommutator- und Induktionsmotoren als Dynamos untersucht und für besondere Fälle empfohlen worden sind. In allen Fällen also sind es nur die Gesetze der Umwandlung der elektromagnetischen Energie, die im Elektromaschinenbau eine Rolle spielen. Ehe wir daher die praktischen Ausführungen näher betrachten, ist es vielleicht erwünscht, die Vorstellungen näher kennen zu lernen, die sich der Konstrukteur elektrischer Maschinen über den Sitz und die Umwandlung elektromagnetischer Energie nach Faraday-Maxwell heutzutage gebildet hat.

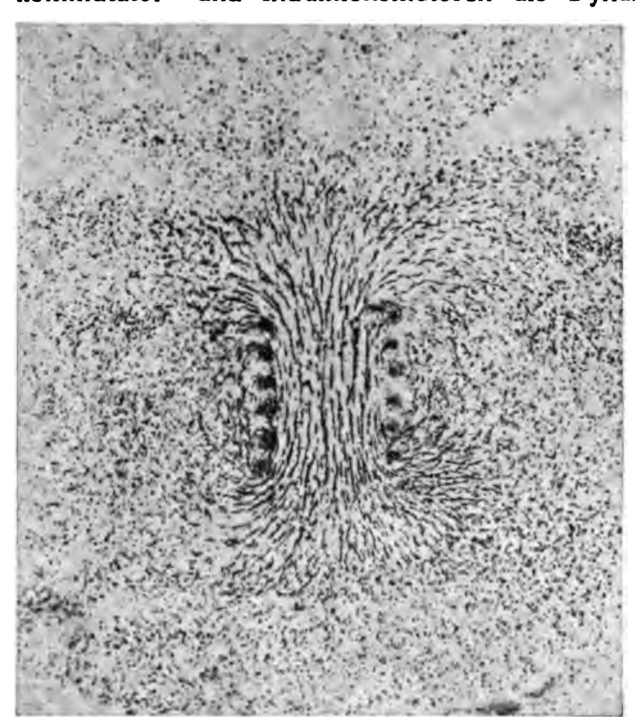


Abbildung 32. Magnetische Kraftlinienverteilung in und um eine stromdurchflossene Spule herum (Solenoid). Die einzelnen Windungen sind im Schnitt sichtbar.

Der Sitz der magnetischen Energie. Bestreut man ein Papier, das über einem Magneten oder in der Nähe einer stromdurchflossenen Spule liegt, mit Eisenfeilspänen, so ordnen diese sich bekanntlich in bestimmten Figuren an, die sich aus Linien verschiedener Richtung in verschiedener Dichte zusammensetzen (Abbildung 31 bis 34). Dies ist nun nach Faraday-Maxwell mehr als ein hübsches Spiel, die Linien deuten vielmehr die Richtung und durch ihre Dichte die Größe der magnetischen Kraft an, die sich nach festen mathematischen Regeln auch genau berechnen läßt. Statt die Eisenfeilspäne wirklich zu streuen, kann man sich besser solche genau berechneten Linien, die „magnetischen Kraftlinien", in und um jeden Magneten und jede stromdurchflossene Spule gezeichnet denken. Die bisher durch nichts widerlegte Hypothese Maxwells sagt dann aus, daß überall im Raume, wo wir entweder solche Kraftlinien durch Eisenfeilspäne nachweisen können oder uns nach der Rechnung vorstellen müssen, der Sitz einer Energie, der magnetischen Energie, ist. Auf diese Energie ist dann der an anderer Stelle dieses Werkes behandelte, berühmte Satz von der Erhaltung der Energie anzuwenden.

Statt daß man nun z. B. früher sagte, ein permanenter Magnet zieht ein Stück weiches Eisen an und leistet dabei mechanische Arbeit, ist die heutige Vorstellung folgende: Im Luftraum zwischen dem Magneten und dem Stückchen weichen Eisens

lassen sich (Abbildung 35) durch Eisenfeilspäne starke magnetische Kraftlinien nachweisen, d. h. es ist dort eine große magnetische Energie vorhanden. Ist das Eisen angezogen worden, so sind diese Kraftlinien verschwunden, die magnetische Energie im Luftraum hat sich also nach dem Prinzip der Erhaltung der Energie in mechanische umgesetzt. Wollen wir das Stück weichen Eisens wieder entfernen, so müssen wir mechanische Arbeit beim Abreißen leisten und stellen dadurch unter Wahrung des Gesetzes von der Erhaltung der Energie die magnetische im Luftraum wieder her.

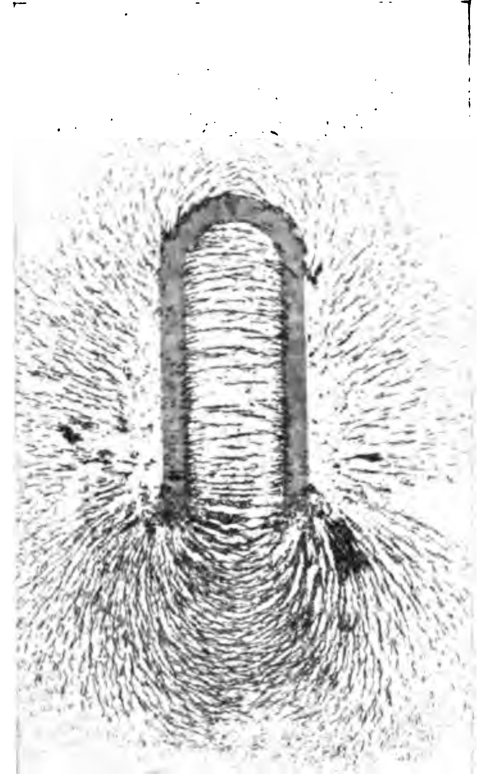


Abbildung 33. Magnetische Kraftlinienverteilung bei einem Hufeisenmagnet.

Oder haben wir es mit einer stromdurchflossenen Spule in Abbildung 32 zu tun, so enthält ebenfalls der ganze umgebende Raum magnetische Energie entsprechend den nachzuweisenden Kraftlinien, die sich nicht ändern, wenn der Strom ein Gleichstrom ist. Alsdann ist also auch nur beim Einschalten des Stromes für die Herstellung des magnetischen Feldes Energie aufzuwenden. Ist dagegen der Strom ein Wechselstrom, so ist auch eine Änderung der Kraftlinien, d. h. ein Anwachsen oder Verschwinden der magnetischen Energie im Raume um die Spule nachweisbar, besonders im Innern der Spule. Es ist nun in vollständigem Einklang mit dem Energiegesetz, wenn z. B. bei Abnahme der magnetischen Energie im Luftraume nicht nur in dem zunächst betrachteten Leiter, sondern auch in jedem andern Leiter jenes Raumes elektrische Energie erscheint. Nach demselben Gesetz ist es sofort verständlich, weshalb um so mehr Energie so durch Induktion übertragen werden kann, je mehr Kraftlinien nachzuweisen sind und je rascher sie sich ändern.

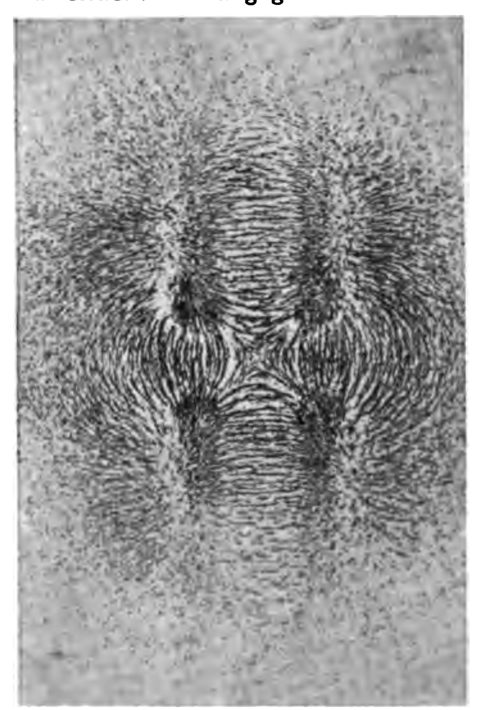


Abbildung 34. Magnetische Kraftlinienverteilung bei zwei gleichen Hufeisenmagneten, deren ungleichnamige Pole einander gegenüberliegen.

In allen elektrischen Maschinen und Apparaten wird nun deshalb Eisen angewandt, weil es, in ein magnetisches Feld hineingebracht, gleichsam die Kraftlinien in sich hineinzieht (vgl. Abbildung 35) oder magnetische Energie stärker als Luft in sich aufspeichert. Ersetzt man einen Luftraum, der rings von Kraftlinien umgrenzt wird, durch Eisen, so ist die magnetische Energie in ihm mehrere hundert-, ja bei gutem weichem

Eisen einige tausendmal so groß wie vorher. Man sagt, das Eisen ist für die magnetische Energie oder die magnetischen Kraftlinien durchlässiger als Luft. Das Verhältnis derjenigen Energie, die bei diesem Beispiel im Eisen vorhanden ist, zu derjenigen, die vorher in der Luft vorhanden war, nennt man die Permeabilität oder Durchlässigkeit des Eisens. Es ergibt sich daraus ohne weiteres, warum wir die Blechpakete für Transformatoren möglichst ohne jede Stoßfuge bauen und den Luftzwischenraum zwischen Anker und Magnetgestell in Dynamos und Motoren sehr klein gegenüber dem wählen, den man ihnen in ihrer ersten Entwicklungszeit zu geben pflegte.

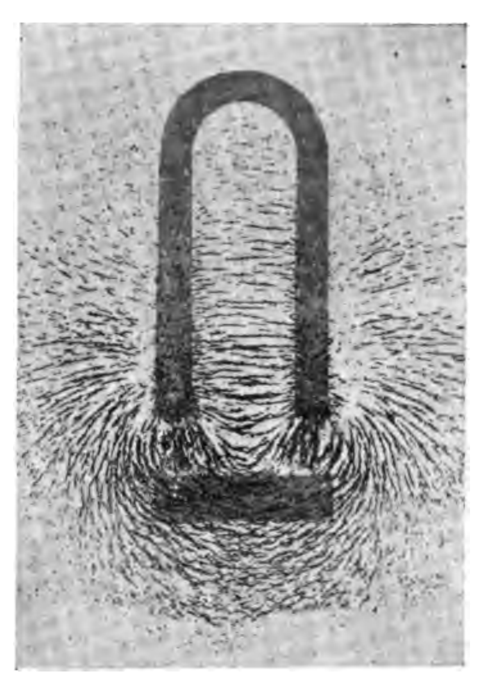


Abbildung 35. Magnetische Kraftlinienverteilung bei einem Hufeisenmagnet mit weichem Eisenstück, ehe es angezogen wird.

Am merkwürdigsten scheint auf den ersten Blick dagegen das Naturgesetz zu sein, daß wir mechanische in elektrische oder elektrische in mechanische Energie umwandeln können, wenn wir einen Leiter durch ein magnetisches Kraftlinienfeld, d. h. einen Raum voll magnetischer Energie hindurchdrehen, ohne dieses Feld selbst zu ändern; oder umgekehrt, daß ein stromdurchflossener Leiter in einem solchen energieerfüllten Raume sich zu drehen beginnt, wie beim Drehspulinstrument oder in jedem Gleichstrommotor, ebenfalls ohne daß sich die magnetische Energie des Feldes ändert. Und doch ist ohne das Magnetfeld weder eine Bewegung des stromdurchflossenen Ankers noch die Erzeugung elektrischer Energie in den Dynamos möglich. Bei näherer Überlegung finden wir aber doch leicht uns bekanntere Analogien zu derartigen Energieumsetzungen. Wollen wir z. B. die Energie der Bewegung eines Rades in Wärme umsetzen, d. h. es abbremsen, so können wir einen Bremsklotz unter Aufwendung einer gewissen Energie, z. B. unter Spannung einer Feder gegen das Rad, anpressen. Die Umwandlung in Wärme, das Abbremsen, ist um so stärker, je stärker der Druck der Feder, d. h. je größer die einmal dafür aufgewendete Energie ist, die doch selbst bei der Umsetzung gar nicht geändert wird, und anderseits je größer die Geschwindigkeit ist. Die Energie, die in der Feder sitzt, kann jederzeit wieder nutzbar gemacht werden, sobald man das Abbremsen, d. h. die Umwandlung mechanischer Energie in Wärme, einstellt. Ganz ähnlich bei der Umsetzung mechanischer Energie in elektrische. Um eine Umsetzung überhaupt zu erhalten, ist die einmalige Aufwendung von magnetischer Energie, d. h. die Herstellung eines starken Kraftlinienfeldes, notwendig. Die Energieumsetzung ist um so größer, je stärker dieses Magnetfeld oder je größer seine magnetische Kraftlinienzahl ist, anderseits nimmt sie zu mit der Geschwindigkeit, mit der die Leiter durch dieses Feld hindurchbewegt

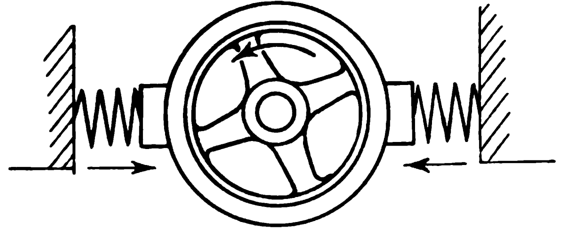


Abbildung 36. Schema der Umsetzung mechanischer Energie in Wärme.

werden. Auch darin stimmen beide Energieumsetzungen miteinander überein, daß bei der Abbremsung des Rades die Bremskraft, bei der Dynamo die Richtung der magnetischen Kraftlinien oder die magnetische Kraft senkrecht zu der rotierenden Oberfläche gerichtet sein muß, soll die umgesetzte Energie ein Maximum werden. Wie aber alle Vergleiche hinken, so auch hier: Die Umwandlung mechanischer Energie in Wärme kann nicht umgekehrt werden, es ist nicht möglich, durch Erwärmen des Bremsklotzes das Rad zum Drehen zu bringen, es ist ein irreversibler Prozeß; die Umwandlung mechanischer in elektrische Energie unter Zuhilfenahme eines magnetischen Feldes ist dagegen reversibel. Wenn Strom von außen durch die Leiter des Ankers geschickt wird, der sich in dem Magnetfelde nach Abbild. 37 befindet, so setzt er sich in Bewegung.

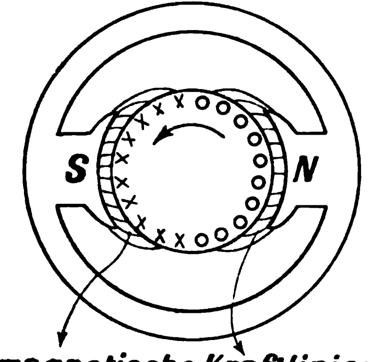


Abbildung 37. Schema der Umsetzung mechanischer Energie in elektrische.

ENTWICKLUNGSRICHTUNGEN IM HEUTIGEN ELEKTROMASCHINENBAU. Immerhin kann man sich nach solchen Analogien etwas greifbarere Vorstellungen von den Grundgesetzen machen, nach welchen die Umwandlung mechanischer Energie in elektrische und umgekehrt vor sich geht, auf denen also einerseits die Elektrizitätserzeuger, die Dynamos oder Generatoren, anderseits die Elektromotoren und Hubmagnete und schließlich die Transformatoren und rotierenden Umformer beruhen, welche elektrische Energie nur in andere elektrische Energie umwandeln. Die außerordentlich rasche Entwicklung aller dieser Maschinentypen, die in gleichmäßig ansteigender Richtung ohne Rückschlag vor sich ging, ist einmal darauf zurückzuführen, daß in der Elektrotechnik noch weit stärker als auf anderen Gebieten des Maschinenbaues von Anfang an Theorie und Praxis einander anregten und stützten, ferner darauf, daß die elektromagnetischen Vorgänge, wie sie der Konstrukteur oder Berechner der Maschine annimmt, genauer der Wirklichkeit entsprechen, als dies z. B. auf manchem Gebiete des Wärmekraftmaschinenbaues der Fall ist. Anderseits ist die Form der Maschinen so einfach, daß mechanische Schwierigkeiten seltener sind, etwa bei sehr großen Dimensionen — als die großen langsamlaufenden Kolbendampfmaschinen zur Konstruktion von Dynamos bis zu 7 m Durchmesser bei horizontaler Welle führten — oder neuerdings bei den Turbogeneratoren, d. h. den Dynamos, die durch Dampfturbinen angetrieben werden, bei denen man auf Umfangsgeschwindigkeiten bis zu 100 m pro Sek. und mehr überzugehen gezwungen war, während die normalen Dynamos und Motoren solche von der Größenordnung 10—30 m/sek. aufweisen. Bei solchen allgemeinen Betrachtungen ist natürlich nie zu vergessen, daß die Elektrotechnik eine weit vorgeschrittene Werkstattpraxis vorfand, die der Dampfmaschinenbau geschaffen hatte.

Nachdem überhaupt erst einmal die Grundgesetze und Grundformen der elektrischen Maschinen durch Siemens, Edison, Schuckert, Ferraris, Hefner-Alteneck, Dolivo-Dobrowolsky und die übrigen Pioniere der Elektrotechnik aufgedeckt und klargestellt worden waren, entbrannte der Kampf der verschiedenen Konstrukteure in dem letzten Jahrzehnt hauptsächlich in bezug auf folgende Fragen:

1. Herunterdrückung der Verluste durch Verbesserung des Materials und damit Vergrößerung des Wirkungsgrades oder Verkleinerung der Dimensionen.

2. Verbesserung der Isolation der den elektrischen Strom führenden Leiter gegeneinander sowohl, wie gegen den stets vorhandenen Eisenkörper. Man ist heute schon

bei Kraftübertragungen und Transformatoren in Deutschland für eine Betriebsspannung von 115000 Volt (Lauchhammer) angelangt, in Amerika von 140000 Volt, und hat auch in Deutschland schon für Prüfzwecke Transformatoren für 500000 Volt gebaut.

3. Günstige Abführung der sich in Wärme umsetzenden Verluste und auch dadurch Verminderung der Dimensionen.

4. Leichte Regulierung der Spannung bei Generatoren, wenn die Tourenzahl gegeben ist.

5. Leichte Regulierung der Tourenzahl der Motoren, wenn ihre Klemmenspannung gegeben ist.

6. Verringern der Funkenbildung bei allen Maschinen, die einen Kollektor oder Kommutator haben, also z. B. bei allen Gleichstrommaschinen.

7. Erzielung einer möglichst großen Leistung bei gegebener Spannung und gegebenem Strom bei Wechselstrommotoren, also eines großen Leistungsfaktors (s. S. 256). Ein kleiner Leistungsfaktor bedeutet zwar, wie wir gesehen haben, an und für sich keinen Verlust an Energie, wohl aber eine geringere Umsetzung an Energie überhaupt, als möglich ist. Indirekt bedeutet aber ein geringer Leistungsfaktor auch Verluste, da die Ströme größer sind, als sie der Leistung bei Gleichstrom entsprechen würden; die Verluste in den Kabeln oder anderen Zuführungsleitungen sind aber nur von der Größe der Ströme abhängig.

8. Anpassung der Maschinen an die besonderen Bedürfnisse dieser oder jener Industrie oder des Verkehrs, wobei sich Probleme gewaltigster wie minimalster Energieumsetzung in gleicher Weise als lösbar erwiesen.

9. Anpassung aller gängigen Typen an die Forderungen der Massenfabrikation.

DIE NORMALEN GENERATOREN. Alle elektrischen Lampen oder Motoren erfordern eine bestimmte konstante Spannung. Wir verstehen daher unter normalen Dynamos oder Generatoren solche Maschinen, welche — von irgendeiner Wärme- oder anderen Kraftmaschine mit konstanter Tourenzahl angetrieben — eine annähernd konstante Klemmenspannung geben bei beliebiger Belastung. Nur annähernd, da ein Spannungsverlust in dem Verteilungsnetze bis zu den Konsumstellen der elektrischen Energie eintritt, etwa 12—15% bei voller Belastung. Die Spannung normaler Dynamos muß also mindestens um 15% nach Belieben erhöht werden können.

Die konstruktiv einfachsten derartigen Maschinen sind die Wechselstrom- und die Drehstromdynamos. In ihnen werden bekanntlich elektrische Wechselstromspannungen in verschiedenartig gewickelten Spulen erzeugt, die entweder durch magnetische Felder hindurch (an magnetischen Polen vorbei) mit mechanischer Kraft gezogen werden, oder an denen Magnetpole unter Aufwendung mechanischer Arbeit vorbeirotieren. Auch hier sprechen wir von Induktion dieser Spannungen, wie beim Transformator; denn obgleich sich die magnetischen Felder absolut nicht ändern — wir haben es mit konstanten, von Gleichströmen erzeugten Feldern zu tun —, so ändern sie sich relativ in bezug auf die Spulen, in denen die Spannungen entstehen; schließen diese Spulen doch bald das magnetische Feld eines Nordpoles, bald eines Südpoles ein. Der Unterschied ist nur, daß beim Transformator die Änderung auf elektrischem Wege durch Änderung des Wechselstroms herbeigeführt wird, was Umsetzung elektrischer wieder in elektrische Energie zur Folge hat, bei den Dynamos durch Drehung, daher Umsetzung mechanischer in elektrische Energie. Nur bei den sehr selten vorkommenden kleinen Typen läßt man übrigens die zu

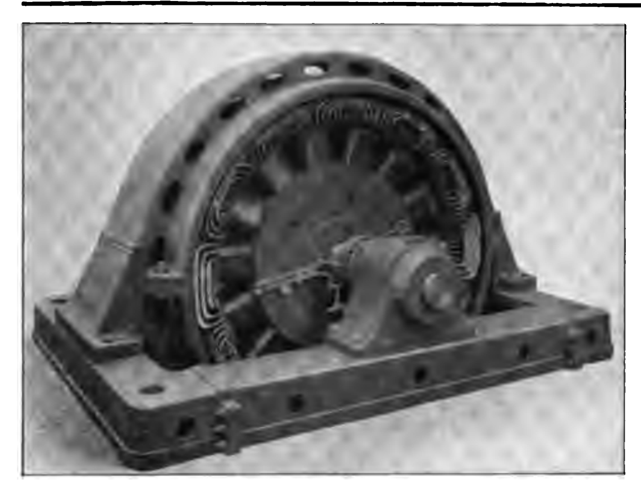
induzierenden Spulen sich drehen, bei allen größeren die Pole, da alsdann nur der Gleichstrom von etwa 65 oder 110 oder 220 Volt Spannung dem rotierenden Teile zugeleitet zu werden braucht, während man in den feststehenden Wicklungen Wechselspannungen bis zu 12000 Volt direkt erzeugen und fortleiten kann. Die Pole sind stets Elektromagnete aus Schmiedeeisen oder Stahlguß mit Wicklungen, denen der Strom einer besonderen Maschine, der Gleichstromerreger - Maschine (Abbildung 38), zugeführt wird. Beim Vorbeirotieren zweier Pole wird immer eine Periode der Wechselspannung erzeugt, da Spannungen entgegengesetzter Richtung unter einem Süd- wie unter einem Nordpol induziert werden. Infolgedessen ist bei gegebener Periodenzahl (50) und Umdrehungszahl die Polpaarzahl bestimmt, gleich minutlicher Periodenzahl (3000) dividiert durch die minutliche Umdrehungszahl. Dies ergibt z. B. 30 Polpaare oder 60 Pole bei einer Kolbendampfmaschine von 100 Umdrehungen pro Minute und 4 Pole bei einer Dampfturbine von 1500 U.P.M. Mit Ausnahme des Antriebs durch größere Wasserturbinen und gelegentlich von Dampfturbinen (Curtis) werden die Dynamos mit horizontaler Welle ausgeführt. Der ringförmige Ständer, in dem die zu induzierenden Wicklungen in Nuten untergebracht sind, ist aus „Dynamoblechen", ausgeglühten Eisenblechen mit geringem Kohlenstoffgehalt, zusammengesetzt und meist durch eine gußeiserne Konstruktion mit Füßen getragen. Bei großen Durchmessern wird der Blechring, dessen Durchbiegung nach Möglichkeit zu vermeiden ist, bisweilen nur von der Seite gehalten (Wangenkonstruktion), außerdem aber in sich durch Verstrebungen versteift. Da die Walzwerke nur Blechtafeln in Größe von 2 × 3 m liefern, so muß der Ring bei großen Maschinen aus Segmenten zusammengesetzt und von Bolzen gehalten werden. Die Nuten sind meist halbgeschlossen oder offen (Abbildung 39 u. 40), so daß die vorher geformten Spulen eingelegt werden können. Auf das Polrad aus Gußeisen oder Stahlguß, das mit mehreren Armen nach Abbildung 38 oder kastenförmig nach Abbildung 41 ausgeführt ist, sind die einzelnen Pole aus Stahlguß oder Dynamoblechen aufgeschraubt oder gleichzeitig schwalbenschwanzförmig eingelassen. Die Erregerwicklungen sind bei den größeren Maschinen meist aus hochkant gewickeltem, blankem Kupfer mit Papierisolation hergestellt. Der Gleichstrom wird ihnen durch Schleifringe aus Bronze oder



Abbildung 38. Drehstrom-Schwungrad-Dynamo der H. Poege, Elektr. A.-G., Chemnitz. Leistung 230 Kilowatt bei einem Leistungsfaktor gleich 1; 5200 Volt werden direkt in den Wicklungen induziert bei 150 Umdrehungen pro Minute. Vorn die Gleichstromerreger-Dynamo auf der verlängerten Welle.

Abbildung 39. Halbgeschlossene Nuten.

Abbildung 40. Offene Nuten.



Abbild. 41. Drehstromgenerator der Siemens-Schuckert-Werke, Berlin: 5625 Kilowatt Leistung bei 6600 Volt Spannung, 50 Perioden bei 428 Umdrehungen pro Minute.

Gußeisen und Bürsten aus Metallgewebe oder Kohle zugeführt.* Außer den Forderungen, die man an jede elektrische Maschine stellt: guter Wirkungsgrad, gute Lüftung, geringer Spannungsabfall in der Maschine selbst, billiger Preis, verlangt man von den Wechsel- und Drehstromdynamos: gutes Parallelarbeiten mit anderen Dynamos, eine Spannungskurve ohne Zacken (also nicht eine Kurve wie in Abbildung 6), sondern möglichst von der Gestalt einer Sinuslinie (Abbildung 11 oder 12), leichten Ersatz durchgebrannter Spulen, anderseits gute Befestigung der Spulen, speziell der vorstehenden Spulenköpfe, so daß selbst bei momentanen Kurzschlüssen, wenn mit gewaltigen Stromstößen auch große momentane mechanische Kräfte auftreten können, keine Verbiegungen derselben eintreten. Auf die be-

* Sehr bestechend ist der Gedanke, Wechsel- oder Drehstrommaschinen so zu bauen, daß außer der „induzierten" Wicklung auch noch die Erregerwicklung feststeht, denn diese Möglichkeit liegt vor. Es sind sogar eine große Anzahl von Lösungen gefunden worden, vielleicht ist folgende aus nebenstehender Abbildung verständlich: eine Spule C von mehreren Metern Durchmesser sucht ein kräftiges Magnetfeld in einem eisernen Gußstück, in das sie bis auf einen bestimmten Luftraum eingebettet ist, zu erzeugen. In dem ebenfalls ringförmigen Luftraum sind in gleichen Abständen Eisenstücke A drehbar so angeordnet, daß sie etwa an einem seitlich gelegenen Schwungrade befestigt sind. Die Kraftlinien werden scheinbar aus dem Luftraum in diese Eisenstücke hineingezogen und dadurch auf bestimmte Stellen konzentriert, die sich aber genau mit den Eisenstücken drehen. Ordnet man an dem Rande des Luftraumes Spulen B an, die voneinander genau so weit wie die Eisenstücke entfernt sind, so befinden sie sich bei deren Drehung bald in einem starken, bald in einem schwachen Magnetfelde; die Kraftlinienzahl, mit denen die Spulen „verkettet" sind, oder deren magnetische Energie ändert sich also auch bei diesen Maschinen, es werden auch so in den Spulen elektrische Spannungen (Wechselspannungen) induziert. Diese Typen mit feststehenden Wicklungen nennt man Induktormaschinen und hat sie vielfach ausgeführt. So bestechend sie auch in mechanischer Hinsicht waren, in elektrischer stellten sich so große Mängel heraus, daß sie wieder vollständig von der Bildfläche verschwunden sind.

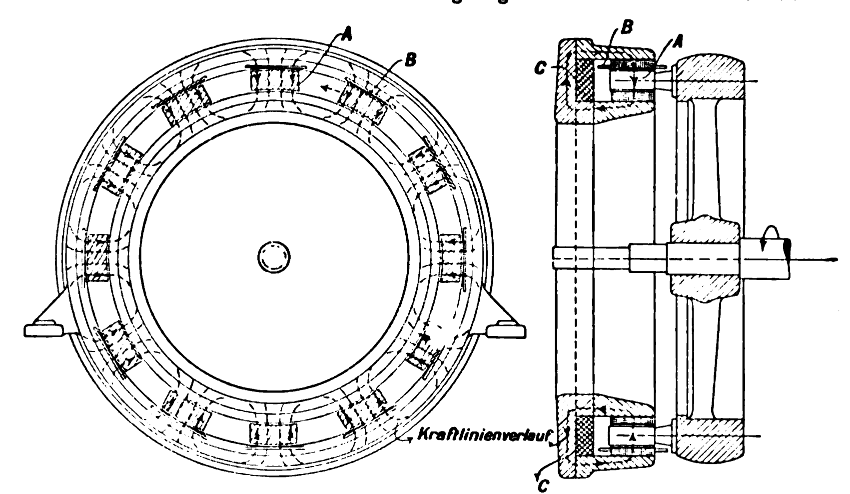


Abbildung 42. Schematische Darstellung einer Induktortype der Allgemeinen Elektrizitäts-Ges. Berlin aus den neunziger Jahren des vorigen Jahrhunderts.

sonderen Ausführungen bei Turbogeneratoren wird später eingegangen (vgl. Abbildung 126 u. 130).

Die Seiten einer Spule sind ungefähr um den Abstand zweier Pole voneinander entfernt, meist aber in verschiedenen Nuten untergebracht, oder es gehören unter jedem Pol mehrere Spulen zu einer Wicklung. Bei Wechselstrommaschinen bleiben einige Nuten ohne Wicklung. Soll Drehstrom in einem Generator erzeugt werden, so ist die Wicklung eines Zweiges oder einer Phase auf ein Drittel der Polteilung zu beschränken und nach Abbildung 44 zwei weitere Wicklungen unterzubringen, so daß die zu einer Phase gehörenden Wicklungen immer um ein Drittel des Abstandes zweier Nord- oder Südpole von den beiden anderen Wicklungen entfernt liegen. Das Maximum z. B. der induzierten Spannung wird dann auch in einem Zweig, einer Phase, um ein Drittel der Periode früher oder später erzeugt als in den beiden anderen, also entsprechend Abbildung 16. Für Drehstromwicklungen muß die Nutenzahl unter einem Pol durch 3 teilbar sein.

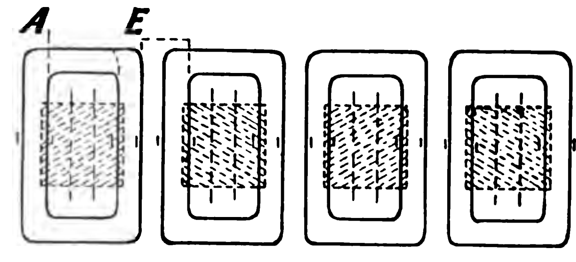


Abbildung 43. Schematische Darstellung einer Wechselstromwicklung in Abwicklung. Die schraffierten Flächen stellen 4 Pole vor, 2 Nuten pro Pol enthalten keine Wicklung.

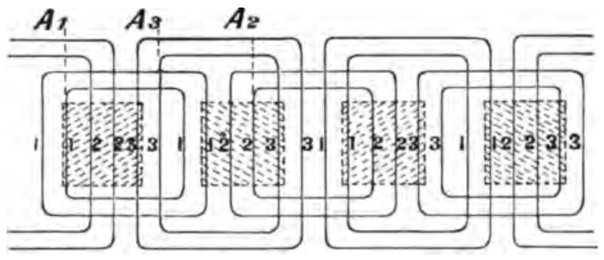
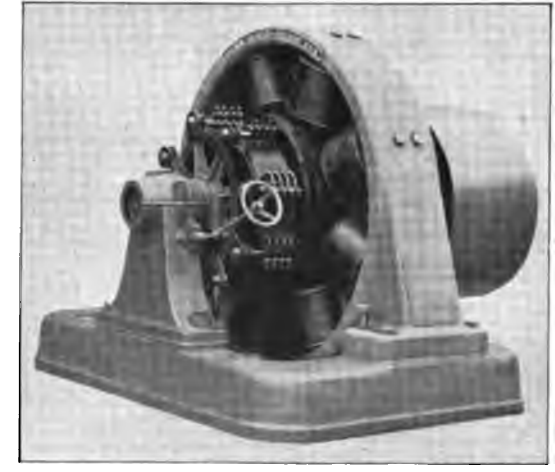


Abbildung 44. Abwicklung einer Drehstromwicklung bei gleicher Nutenzahl wie in Abbildung 43.

Die normale Gleichstromdynamo ist die Nebenschlußmaschine, bei der die Wicklung des Magnetfeldes, auch Feld- oder Erregerwicklung genannt, an die Spannungsklemmen der Maschine angeschlossen wird, ebenso wie das Verteilungsnetz selbst; die Feldwicklung wird also diesem parallel oder in Nebenschluß gelegt. Die Pole stehen im Gegensatz zu denen der Wechselstrommaschinen stets still, während die Ankerwicklungen sich drehen. Die zu induzierenden Wicklungen sind fast durchgängig in offenen Nuten (Abbildung 40) des wieder aus Dynamoblechen bestehenden Ankerkörpers untergebracht, da sie stets vorher gewickelt und geformt, mit Isolation versehen und dann in die Nuten eingebracht werden. Man nennt diese Wicklungen Trommelwicklungen, die Anker Trommelanker. Da die Spulen genau wie bei den Wechselstrommaschinen bald an einem Nord-, bald an einem Südpol vorbeirotieren, so werden in den Spulen selbst auch Wechselspannungen induziert. Die eine Seite einer Spule liegt immer unter einem Nordpol, wenn die andere unter einem Südpol liegt, die Spulen selber sind dann entweder so verbunden, daß


Abbildung 45. Gleichstrom-Nebenschluß-Dynamo oder Motor mit Riemenantrieb. Ausführung der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft, Berlin.

sie Schleifen oder daß sie Wellenlinien auf der Oberfläche des Ankers bilden, derart, daß man von einem Punkt ausgehend sämtliche Spulen durchläuft und zum Ausgangspunkt zurückkehrt. Die verlöteten Enden zweier Spulen sind zu den „Lamellen" des Kommutators geführt, häufig durch besondere Verbindungsteile. Die Lamellen bestehen aus gezogenem Kupfer, von dem Querschnitt eines Ringsegments, zwischen ihnen liegt Glimmerisolation. Man legt Bürsten aus Kohle auf dem Kommutator an der Stelle an, wo diejenigen Spulen angeschlossen sind, deren Drähte gerade zwi-

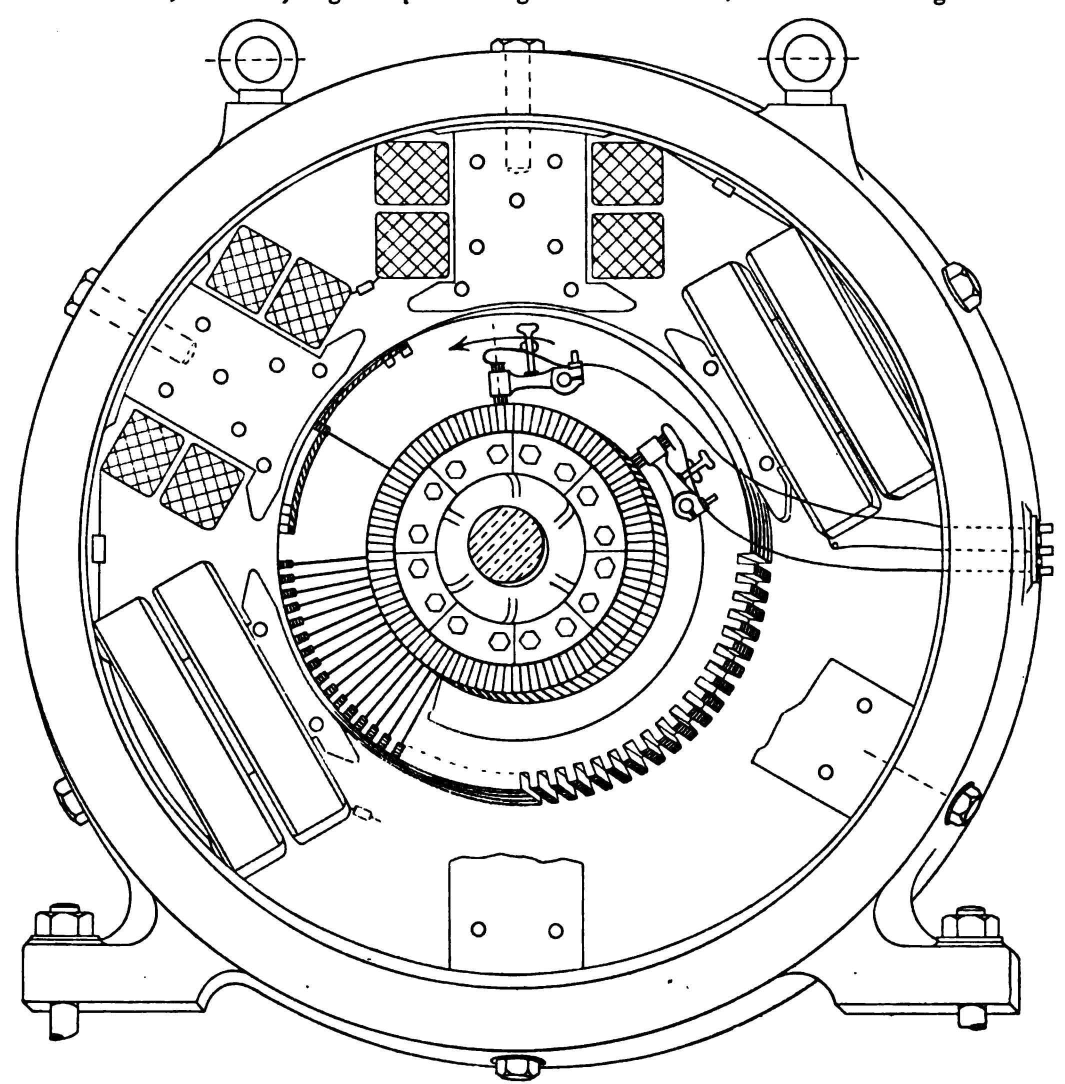


Abbildung 46. Schematische Darstellung von Konstruktionseinzelheiten einer Gleichstromdynamo durch verschiedene Schnitte und Ansichten in derselben Figur.

schen 2 Polen liegen. Zwischen zwei benachbarten Bürsten mißt man dann bei Schleifenwicklung die Summe aller Spannungen, die in den Drähten unter einem Pol induziert werden, bei Wellenwicklung summieren sich sogar die Spannungen der Drähte unter sämtlichen Nord- oder Südpolen. Die Spannung, die in irgendeinem Moment

an den Bürsten beobachtet wird, muß mit großer Annäherung auch dauernd beobachtet werden, da immer eine Spule an die Stelle der anderen tritt, wenn auch die Spannung in jeder einzelnen Spule andauernd sich ändert. Eine genau gleiche Spannung

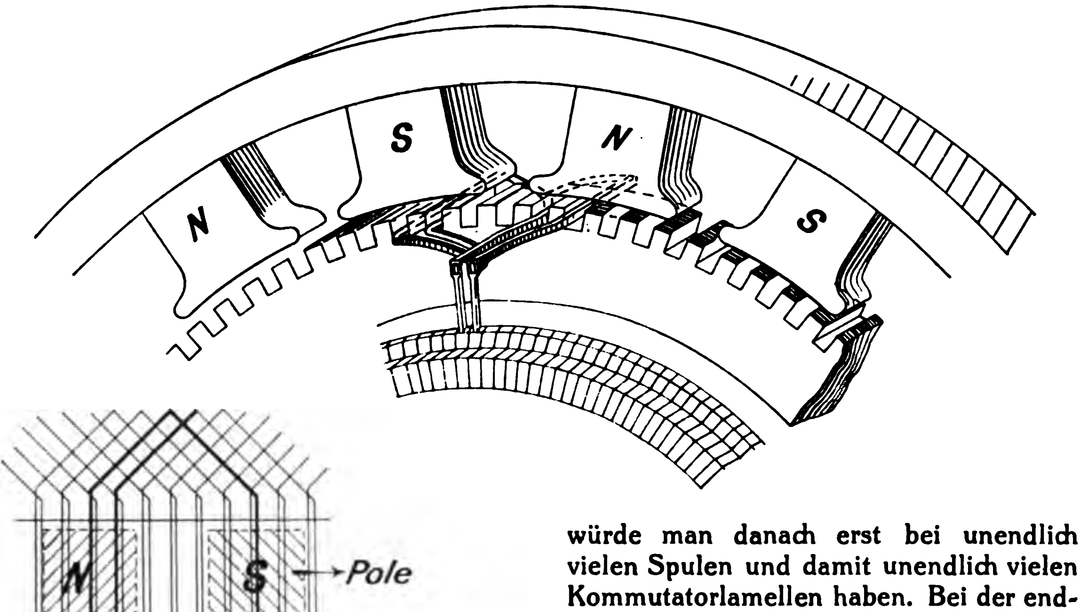


Abbildung 47. Perspektivische Ansicht und schematische Abwicklung einer Schleifenwicklung.

würde man danach erst bei unendlich vielen Spulen und damit unendlich vielen Kommutatorlamellen haben. Bei der endlichen Zahl der praktisch ausgeführten Maschinen erhalten wir aber auch für alle technischen Probleme eine vollkommen genügend gleichmäßige, stets gleichgerichtete Spannung, die wegen der Glühlampen 110, 220 oder auch 2×220 Volt (+10 bis 15 %) normal beträgt. Sämtliche Spulen werden, sobald Strom durch die Feld- oder Erregerwicklung fließt und die Ankerklemmen mit dem Verteilungsnetz verbunden sind, je nach dem Widerstand im Netze von einem bestimmten Strom, und zwar in derselben Richtung, durchflossen, solange sie sich unter einem Pol befinden, aber genau von dem entgegengesetzten, sobald sie unter den nächsten Pol kommen. Im Augenblick, wo sie, resp. die zugehörigen Kommutatorlamellen, unter der Bürste durchgleiten, muß ihr Strom umgekehrt, d. h. kommutiert werden.

Der Kommutierungsvorgang. Die Ströme im Anker erzeugen natürlich auch ein Magnetfeld, d. h. um die Spulen herum wird magnetische Energie aufgespeichert, die sich also nicht ändert, solange die Spulen, von demselben Strom durchflossen, unter einem Pol vorbeirotieren. Sobald aber das Ende einer Spule, d. h. die zugehörige Kommutatorlamelle unter der Bürste weggleitet, soll nun mit einem Male das Magnetfeld mit der geänderten Stromrichtung auch in entgegengesetzter Richtung vorhanden sein. Die vorige magnetische Energie soll also entfernt und eine geradeso große von der entgegengesetzten Wirkungsrichtung aufgebaut werden, alles in der kurzen Zeit, während die Spule resp. ihre Lamelle unter der Bürste weggleitet. Die

Schwierigkeiten wachsen also mit der Größe der magnetischen Energie, die sich infolge der Ankerströme um die Ankerleiter bildet, d. h. außer mit der Stromstärke mit der Länge dieser Leiter und der Windungszahl der Spule, anderseits mit der

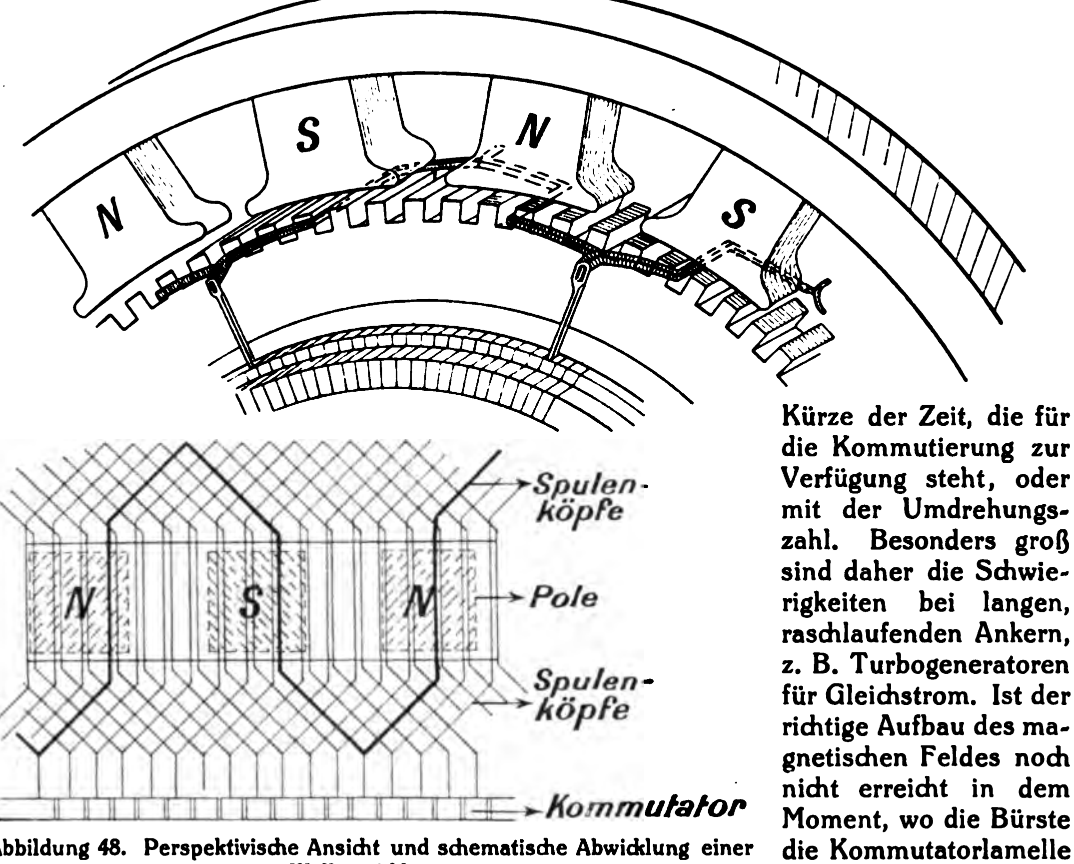


Abbildung 48. Perspektivische Ansicht und schematische Abwicklung einer Wellenwicklung.

Kürze der Zeit, die für die Kommutierung zur Verfügung steht, oder mit der Umdrehungszahl. Besonders groß sind daher die Schwierigkeiten bei langen, raschlaufenden Ankern, z. B. Turbogeneratoren für Gleichstrom. Ist der richtige Aufbau des magnetischen Feldes noch nicht erreicht in dem Moment, wo die Bürste die Kommutatorlamelle verläßt, so zeigt sich die nicht entfernte Energie in dem Funken am Kommutator, d. h. sie setzt sich in nutzlose, ja sogar für den Kommutator sehr schädliche Wärme um. Wir können aber auch die vor der Kommutierung vorhandene magnetische Energie des Ankerleiters durch einen reversibeln Prozeß aufnehmen und durch andere ersetzen, wir müssen dazu also sicher auch Energie von außen in die Spule hineinliefern, deren Kommutatorlamellen gerade unter den Bürsten stehen und von ihr kurzgeschlossen werden. Das ist tatsächlich möglich durch die Induktion und geschieht bei allen normalen Dynamos dadurch, daß man die Bürsten aus der oben gekennzeichneten Stellung, der sogenannten neutralen Zone, in der Drehrichtung verschiebt und die kurzgeschlossene Spule dadurch in ein induzierendes Magnetfeld bringt. Man findet dann leicht für irgendeine Belastung die Stelle, wo das Funken vollständig verschwindet. Der wirkliche Vorgang ist dann der, daß — alles in einem kleinen Bruchteil einer Sekunde — im ersten Moment die magnetische Energie des Ankerleiters in Form mechanischer an die Antriebsmaschine zurückgegeben wird, im nächsten mechanische Energie wieder abgegeben wird zum Aufbau des magnetischen Feldes von umgekehrter Richtung um

den Ankerleiter herum. Da mit der Belastung sich der Strom im Anker ändert, ändert sich auch immer die magnetische Energie um den Leiter: die Forderungen für die Kommutierung werden andere, wir müßten die Bürsten für jede Belastung verstellen. Von allen Maschinen wird aber heute verlangt, daß die Bürsten nicht verstellt zu werden brauchen. Man stellt daher auf gute Kommutierung bei einer mittleren Belastung ein und erhält dann auch für alle normalen Maschinen befriedigende Verhältnisse von Leerlauf bis Vollast, aber nur bei Kohlebürsten, nicht bei Kupfergazebürsten, denn Kohle hat einen viel höheren Widerstand als Kupfer, durch die Bürste wird aber die zu kommutierende Spule kurzgeschlossen. Daher kann in der Kohlebürste in den Fällen unrichtiger Bürstenstellung einige der zu vernichtenden magnetischen Energie in Wärme umgesetzt werden, während dieser Betrag bei einer Kupferbürste wegen ihres geringen Widerstandes nur geringfügig sein würde. Andere Methoden zur Lösung dieser fundamentalen Aufgabe des Gleichstrommaschinenbaues, der Vermeidung des Funkens, werden später geschildert; die Verschiebung der Bürsten ist die billigste, und wenn auch keine ideale Lösung, doch für normale Maschinen ausreichend, wird daher auch heute noch von fast allen Maschinenfabriken angewandt.

Die Möglichkeit der Selbsterregung der Gleichstromdynamos. Läuft die Dynamo, schaltet man aber die Feld- oder Erregerwicklung noch nicht ein, fließt also noch kein Strom durch sie, so kann man an den Ankerklemmen doch eine kleine Spannung beobachten, die in einem zurückgebliebenen oder remanenten Magnetismus des Magnetgestelles ihren Grund hat, einer Nebenerscheinung der Hysterese (s. S. 298). Auch ohne daß die Spulen von Strom durchflossen werden, sind nämlich eine Anzahl Molekularmagnete in dem Eisen noch gerichtet von dem vorigen Mal der Magnetiesierung her. Der kleine Strom, der beim Verbinden der Anker- mit den Feldklemmen durch die Feldspulen fließt, verstärkt (bei richtiger Schaltung) das magnetische Feld, vergrößert die Spannung, diese wieder den Strom usw. Diese Möglichkeit der Selbsterregung wurde von Werner Siemens gefunden und war für die Verbreitung der Gleichstrommaschine von größter Bedeutung. Die Spannung würde nun ins Ungemessene steigen, wenn der Magnetismus proportional mit dem Strom anstiege. Das ist bekanntlich nicht der Fall, jedes Eisen kann magnetisch gesättigt werden. Wird auch nur ein Teil des magnetischen Feldes magnetische Sättigung zeigen, so steigt die Spannung langsamer als der Feldstrom, sie wird sich bei dem Vorgang der Selbsterregung einem Grenzwert nähern. Man wählt schon lange als zu sättigenden Teil des Kraftlinienweges die sogenannten Zähne des Ankers, da dadurch am meisten Material gespart wird und die Maschinen am billigsten werden. Die Kurve, die die Abhängigkeit zwischen Spannung und Feldstrom darstellt (vgl. Abbildung 49), wird magnetische Charakteristik der Maschine genannt. Diese muß also eine stark gekrümmte Form haben, soll die Dynamo sich auf eine bestimmte Spannung immer bei Selbsterregung einstellen und — kann man hinzufügen — nicht bei jeder Tourenschwankung sofort starke Spannungsschwankungen zeigen.

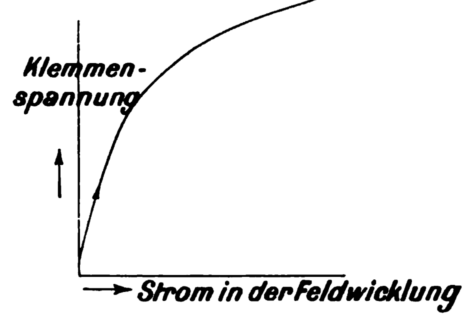


Abbildung 49. Magnetische Charakteristik einer Gleichstrommaschine.

Vielfach hat man sich früher den Kopf darüber zerbrochen, ob man nicht auch Gleichstromdynamos ohne Kommutator bauen könne. Das ist mit Spulen aus-

geschlossen, dagegen ist es möglich, in Stäben, deren Enden mit Schleifringen verbunden sind, eine stets gleichgerichtete Spannung zu erzeugen, wenn man sie dauernd senkrecht durch ein stets gleichgerichtetes magnetisches Feld hindurchbewegt. Macht man die ganze Mantelfläche eines Zylinders z. B. zu einem Südpol und die Grundflächen zu Nordpolen (Abbildung 50), so wird ein Stab auf der Zylinderoberfläche bei einer Drehung um die Achse des Zylinders dauernd senkrecht zu einem stets gleichgerichteten magnetischen Feld bewegt. Bringt man an den Kanten des Zylinders Schleifringe an, so kann man von ihnen mittels Bürsten eine stets gleichgerichtete Spannung erhalten. Diese schon lange bekannte Dynamo, die man fälschlich als Unipolarmaschine bezeichnet, hat sich trotz neuerer Versuche der General Electric Co. wegen zu geringer Spannung oder zu großer Verluste bisher ein Feld nicht erobern können.

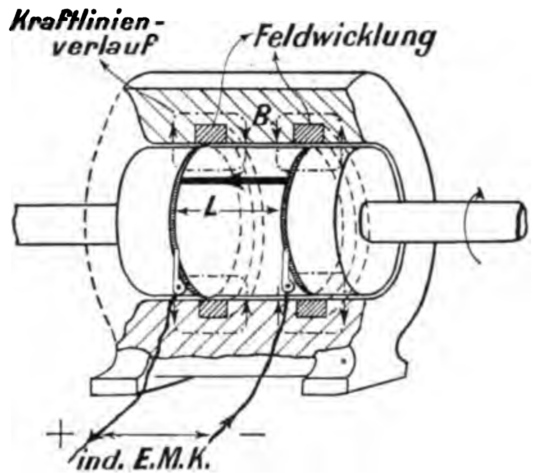


Abbildung 50. Schematische Darstellung einer Unipolarmaschine.

Die Spannung wird bei allen normalen Dynamos reguliert durch Änderung der Feldstromstärke. Dazu wird in diesen Stromkreis noch ein Regulierwiderstand eingebaut (Abbildung 51). Will man die Spannung erhöhen, so wird dieser ausgeschaltet, d. h. verkleinert, so daß nach dem Ohmschen Gesetz ein stärkerer Strom fließt und dadurch das Magnetfeld zunimmt. Durch dessen Verstärkung wird die umgesetzte Energie vermehrt oder die Spannung erhöht, gerade wie dies beim abgebremsten Rade geschieht. Über das Problem der Spannungsregulierung findet man weitere Betrachtungen auf S. 318 und S. 354.

Das Parallelschalten normaler Dynamos. Mehrere Gleichstrom-Nebenschlußdynamos lassen sich ohne Schwierigkeiten parallel schalten. Man braucht sie nur vor dem Schließen des Schalters durch entsprechende Regulierung des Widerstandes in der Zuleitung zu ihrer Feldwicklung genau auf dieselbe Spannung zu bringen. Ganz anders liegen die Verhältnisse bei Wechselstrom- oder Drehstrommaschinen. Reguliert man sie z. B. nach einem Hitzdraht-Voltmeter auf dieselbe effektive Spannung ein (vgl. S. 254), so heißt das nur, daß in den Voltmetern sich die gleiche Wärme entwickelt, wie wenn man

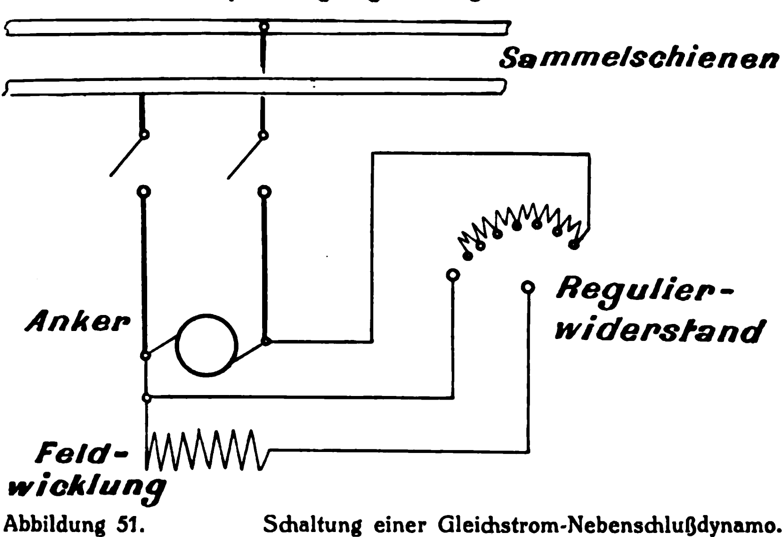


Abbildung 51. Schaltung einer Gleichstrom-Nebenschlußdynamo.

eine gleichgroße Gleichstromspannung anlegen würde. Von der Periodenzahl und von dem Phasenzustand der Spannung in beiden Maschinen sind die Angaben des Voltmeters unabhängig. Es ist daher möglich, daß entweder trotz gleicher Effektivspannung die momentanen Werte das Bild der Abbild. 52 besitzen, oder,

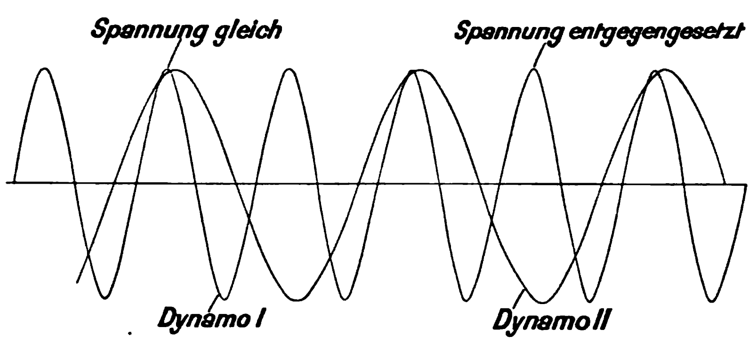


Abbildung 52. Bild der Spannungswellen zweier Dynamos bei gleichem Effektivwert, aber verschiedener Periodenzahl.

falls auch die Periodenzahl dieselbe ist, daß der Phasenzustand ein verschiedener ist nach Abbildung 53. In beiden Fällen sind zwischen den Klemmen der beiden Maschinen fortwährende Spannungsunterschiede vorhanden. Es muß dagegen zum Parallelschalten verlangt werden, daß beide Spannungskurven vollständig zusammenfallen, d. h. gleiche Gestalt, gleiche Maximal- und damit Effektivwerte, gleiche Periodenzahl und gleichen Phasenzustand besitzen. Man ersieht dies durch Verwendung von „Phasenlampen", welche zwischen den parallel zu schaltenden Leitungen, z. B. nach Abbildung 54, angeschlossen werden. Die Lampen erlöschen vollständig, wenn keine Spannungsunterschiede vorhanden sind,

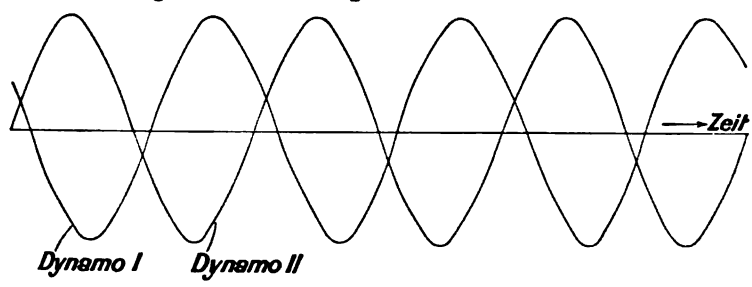


Abbildung 53. Bild der Spannungswellen zweier Wechselstromdynamos bei gleichem Effektivwert und gleicher Periodenzahl, aber mit Phasenverschiebung.

andernfalls leuchten sie auf. Bei verschiedenen Periodenzahlen müssen sich, wie Abbildung 52 zeigt, Momente des Hellbrennens und Dunkelbrennens periodisch folgen, um so rascher, je verschiedener die Periodenzahl ist. Man reguliert also so lange, bis die Lampen während einer längeren Periode dunkel bleiben, und schaltet in einem solchen Moment ein. Andere Schaltungen für denselben Zweck sind noch mehrfach angegeben worden. Sind die Maschinen einmal parallel geschaltet, so erhalten sie sich gegenseitig dauernd auf genau gleicher Periodenzahl und gleichem Phasenzustand, da diejenige Maschine, welche die Tendenz hätte, langsamer zu laufen, von der anderen Energie aufnimmt und als Motor (Synchronmotor) weiterläuft. Daß die Möglichkeit der Entwicklung eines Drehmoments in einer Wechselstrom- oder Drehstrommaschine vorhanden ist, ist leicht einzusehen: ein stromdurchflossener Leiter im Felde eines Poles erfährt eine bestimmte Kraft (vgl. das Drehspulinstrument); so-

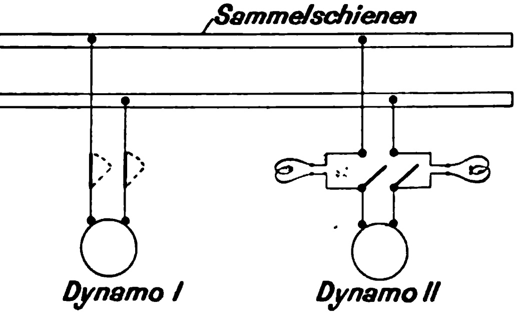


Abbildung 54. Schaltung von Phasenlampen zum Parallelschalten einer Wechselstromdynamo.

lange der Strom nur seine Stärke, aber nicht seine Richtung ändert, bleibt auch das Drehmoment gleichgerichtet, wenn auch von wechselnder Stärke. Tritt der Richtungswechsel des Stromes im selben Moment ein, wo der Leiter auch in das Feld des entgegengesetzten Poles kommt — und das hat eben im Synchronmotor zu geschehen —, so kehrt auch jetzt noch nicht das Drehmoment seine Richtung um, es kann also dann wirklich dauernd Arbeit geleistet werden. Man kann auch sagen: die wechselnden Ströme müssen im selben Tempo zugeführt, wie die Wechselspannungen in den Maschinen erzeugt werden, d. h. synchron. Das Drehmoment wirkt natürlich geradeso gut in der Dynamo wie im Motor, in der Dynamo als Gegendrehmoment gegen die antreibende Kraftmaschine, beim Motor bei umgekehrter Stromrichtung als wirkendes Moment zur Verrichtung der Arbeit.

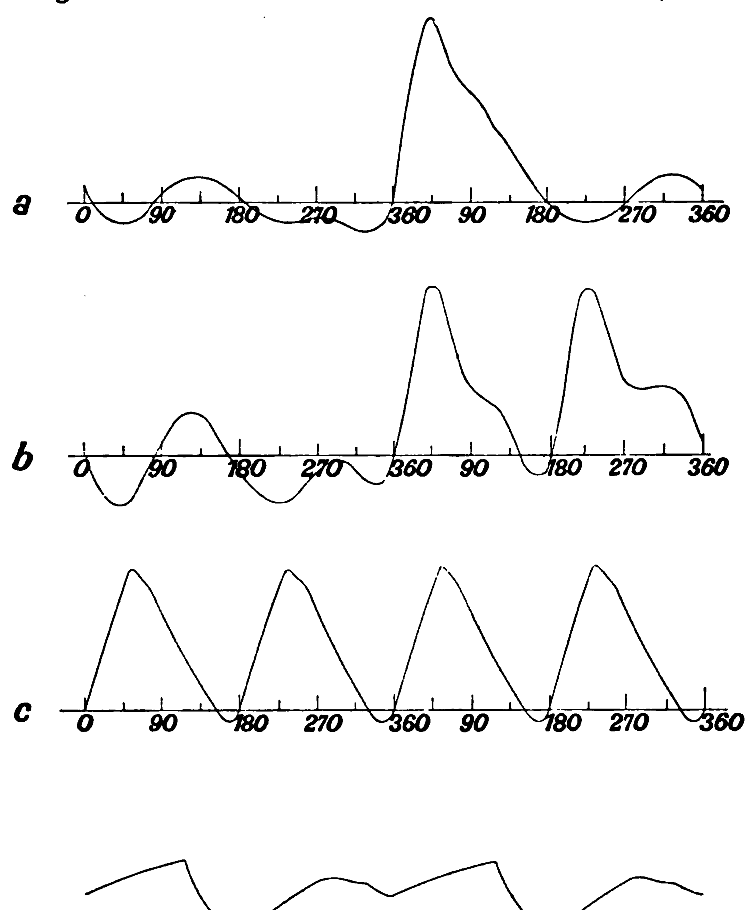


Abbildung 55. Schwankung des Antriebdrehmoments: a) eines 4-Takt-Gasmotors; b) eines 2-Takt-Gasmotors; c) einer einfachen oder Tandem-Dampfmaschine; d) einer Compound-Dampfmaschine.

Je weniger die eine Maschine zeitweise die andere als Motor mitzureißen sucht, um so besser arbeiten sie parallel. Sind Schwankungen vorhanden, so tritt leicht das „Pendeln" der Maschinen ein, indem die eine Dynamo die andere als Motor antreibt, aber dabei selbst zuviel Energie abgibt, so daß sie selbst im nächsten Moment von der anderen mitgerissen werden muß. Werden die Energieschwankungen nun mit der Zeit größer statt kleiner, so fallen die Maschinen endlich „aus dem Tritt".

Das Parallelarbeiten der Dynamos spielt bei der Wahl der Antriebmaschinen eine sehr große Rolle, früher mehr als heute. Je unregelmäßiger der Antrieb, oder je größer sein Ungleichförmigkeitsgrad, um so größer die Gefahr, daß die Maschinen pendeln und aus dem Tritt fallen. Zur Beurteilung der Gleichförmigkeit einer Maschine kommt es darauf an, festzustellen, wie stark die Kraft an der Welle schwankt, auf welcher der Anker der Dynamo befestigt werden soll, diese Kraft ändert sich z. B. bei einem 4-Takt-Gasmotor etwa nach Abbildung 55a, bei einem doppeltwirkenden Gas-

motor nach Abbildung 55b, bei einer einfachen oder Tandem-Dampfmaschine nach Abbildung 55c, bei einer Compound-Dampfmaschine etwa nach Abbildung 55d, während bei einer dreifachen Expansionsmaschine, deren Kurbeln um 120° versetzt sind, die Abweichungen schon sehr gering sind und eine Wasser- und eine Dampfturbine ein konstantes Drehmoment aufweisen. Die Schwankungen des Drehmoments können nun durch zweierlei ausgeglichen werden, so daß kein Pendeln der Maschinen eintritt: einmal durch hinreichend große Schwungräder, welche Energie der Bewegung, auch „kinetische Energie" genannt, in sich aufspeichern und wieder abgeben können — auf die Dynamowelle wird dann schon ein entsprechend gleichmäßigeres Drehmoment ausgeübt. Anderseits durch Dämpfungseinrichtungen, die das Hin- und Herpendeln der Energie zwischen den Maschinen hemmen. Eine solche Dämpfung üben z. B. Kupferbänder aus, die um die Pole der Dynamos gelegt, oder Kupferstäbe, die durch sie hindurchgesteckt werden. Auf den Grund dieses Verhaltens kann hier nicht näher eingegangen werden. Auch Wechsel- oder Drehstromdynamos mit Polen aus kompakten Stahlgußstücken zeigen die Eigenschaften des Pendelns weniger als solche, deren Pole aus einzelnen Blechen aus Fluß- oder Schmiedeeisen zusammengenietet sind, was aus anderen Gründen, nämlich zur Vermeidung von Verlusten (vgl. S. 299), erwünscht ist. Die Neigung zum Pendeln bei Drehstromdynamos nimmt selbstverständlich in der Reihenfolge der obengenannten Antriebmaschinen ab.

Je stärker also unter ihnen die Wasser- und Dampfturbinen hervortreten, um so mehr verschwindet die Gefahr des Pendelns und damit das Interesse an dieser Frage, das heute hauptsächlich auf die Verhältnisse in Zentralen mit Öl- oder Gasmaschinen konzentriert ist. Auch hier würde sie mit der Konstruktion der Gasturbine zu den überwundenen gehören.

NORMALE MOTOREN. Unter normalen Motoren versteht man solche, die

1. bei verschiedenen Belastungen stets mit annähernd konstanter Tourenzahl laufen;
2. sich nur in einer Richtung drehen;
3. ein kräftiges Drehmoment auch bei Anlauf ergeben.

Es sind ja sicherlich 90% aller Fälle, in denen diese Forderungen gestellt werden. Allgemein kann die Aufgabe konstanter Tourenzahl nur gelöst werden bei konstanter Spannung des Netzes, die ja aber gerade auch in allen normalen Dynamos erzeugt wird.

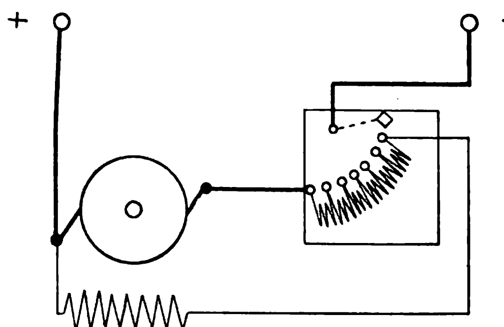


Abbildung 56. Kleiner Gleichstrommotor der Allgem. Elektr.-Ges., Berlin; auseinandergenommen.

Der normale Gleichstrommotor ist der Nebenschlußmotor, der sich nur in seiner Bürstenstellung von der Nebenschlußdynamo unterscheidet. Fabrikationsmäßig braucht überhaupt kein Unterschied zwischen Gleichstromdynamo und Motor zu sein, er wird normal auch für 110, 220 und 440 Volt gebaut. Kleinere Typen werden aber natürlich hauptsächlich als Motoren gebraucht (Abbildung 56). In seiner Wirkung ist er die einfache Umkehrung der Dynamo: arbeitet z. B. eine normale Dynamo auf eine Akkumulatorenbatterie, um sie zu laden, und schaltet man nun allmäh-

lich immer mehr und mehr Akkumulatorenzellen zu, so wird der Strom im Anker der Dynamo immer kleiner werden, ja, sich zuletzt umkehren. Der Strom im Feld ändert seine Richtung nicht, ebensowenig wie die Drehrichtung der Maschine sich ändert. Sobald aber der Strom im Anker seine Richtung ändert, wird jetzt die Akkumulatorenbatterie elektrische Energie hergeben, diese wird in mechanische verwandelt und die bisherige Kraftmaschine nun von der elektrischen Maschine als Motor angetrieben. Natürlich wird durch die Drehung des Ankers in demselben magnetischen Feld wie vorher auch dieselbe Spannung in den Ankerleitern wie bisher, also von gleicher Richtung, induziert, sie ist nur der Stromrichtung jetzt entgegengesetzt und wird deshalb als elektromotorische Gegenkraft bezeichnet. Wegen der Änderung der Stromrichtung im Anker ist auch das magnetische Feld der Ankerleiter, dessen Energie die Schwierigkeiten der Kommutation bedingte, entgegengesetzt gerichtet. Nähere Überlegung zeigt, daß infolgedessen auch die Bürsten im entgegengesetzten Sinne zu verschieben sind, soll eine gute Kommutation erzielt werden, d. h. soll in einem reversibeln Prozeß die Energie des magnetischen Feldes des Ankerleiters als mechanische entzogen und wieder Energie von der entgegengesetzten Wirkungsrichtung um den Ankerleiter herum aufgebaut werden.

Das Anlassen und Ausschalten des Nebenschlußmotors. Beim Anlassen des Motors kann die Feldwicklung sofort an die Netzspannung gelegt werden; es dauert sogar einige Zeit (bis zu einigen Sekunden bei großen Maschinen), bis der Strom seinen konstanten Wert erreicht hat, da von der verfügbaren Energie zunächst ein Teil in die magnetische Energie des Feldes umgewandelt werden muß. Der Anker wird dagegen durch den Anlaßwiderstand mit den Klemmen des Netzes verbunden; ohne diesen würden die Ströme im Anker viel zu groß werden, wird doch bei Stillstand noch keine elektromotorische Gegenkraft entgegen der Stromrichtung wie bei Lauf erzeugt. Erst mit zunehmender Tourenzahl kann der Anlaßwiderstand mehr und mehr ausgeschaltet werden. Beim Ausschalten liegt die Gefahr vor, daß sich die besonders im Felde angesammelte magnetische Energie durch Funken und Lichtbogenbildung an den Schaltern unangenehm bemerkbar macht. Man vermeidet dies, indem man Anker und Feld zusammen vom Netz lostrennt, aber noch miteinander verbunden läßt. Dann läuft die Maschine weiter als Dynamo, die vom Netz abgetrennt ist, und die ihr noch innewohnende Energie wird in kurzer Zeit in Reibung und Wärme umgesetzt sein.



Abbild. 57. Schaltungsschema eines Nebenschluß-Gleichstrommotors.

Tourenregulierung des Nebenschlußmotors. Bei steigender Belastung steigt naturgemäß die Stromstärke, die der Anker aufnimmt, da ja eine konstante Klemmenspannung vorhanden ist und also nur eine Vergrößerung des Stroms eine Vergrößerung der zugeführten Energie bewirken kann. Die Tourenzahl des Motors fällt bis zur vollen Belastung um 4 bis 8 %, je nach der Größe der Motoren. Soll die Tourenzahl vollständig konstant oder auch noch bis zu etwa 10 oder 15 % beliebig erhöht werden, so ist das möglich durch Verringerung des Feldstroms oder durch Einschalten von Widerstand in dessen Kreis. Zunächst würde man annehmen, daß man das magnetische Feld, d. h. den es erregenden Strom, verstärken müßte, da ja ein stärkeres Magnetfeld ein größeres Dreh-

moment in einem Ankerleiter hervorruft, der von einem bestimmten Strom durchflossen wird (vgl. S. 270). Daß aber gerade das Gegenteil zum Ziele führt, kann man sich vielleicht verständlich machen, wenn man an das Analogon des abgebremsten Rades denkt. Auch dort wird das Gegendrehmoment beim Bremsen erhöht, wenn man die Bremskraft steigert. Verlangt man aber, daß die Umsetzung der mechanischen Energie in Wärme bei einer höheren Tourenzahl des Rades vor sich geht, so muß man nicht die Bremse fester anziehen, sondern sie lockern. Ebenso muß die Energie des magnetischen Feldes im Motor zu rascherem Lauf etwas vermindert werden. Damit aber das notwendige Drehmoment erzeugt wird, muß eben ein größerer Strom zugeführt werden, als bei dem stärkeren Feld und der geringeren Tourenzahl vorhanden ist.



Abbildung 58. Asynchroner kleiner Drehstrommotor mit Kurzschlußanker der Allg. Elektr.-Ges., Berlin; auseinandergenommen.

Der normale Motor für Wechsel- oder Drehstrom ist nicht die Umkehrung der entsprechenden Dynamos. Ganz allgemein muß ja freilich, wie schon früher erläutert wurde, aus jedem Motor eine Dynamo und umgekehrt abzuleiten sein, da alle elektromagnetischen Vorgänge reversible, d. h. umkehrbare Prozesse sind. Diese Umkehrung ist auch bei einer im Lauf befindlichen Wechsel- oder Drehstromanlage gerade so gut möglich, wie dies bei der Gleichstrommaschine beschrieben wurde. Bei Umkehrung der Drehstrom- und Wechselstromdynamos spricht man von den Drehstrom- oder Einphasensynchronmotoren, wie schon bei der Besprechung des Parallelschaltens erwähnt wurde. Diese entwickeln aber bei Stillstand kein Drehmoment, ebensowenig wie ein Drehspulinstrument ein Drehmoment entwickelt, wenn es von Wechselstrom durchflossen wird. Sie sind deshalb nicht zu den normalen Maschinen zu rechnen. Sie werden im allgemeinen nur in den seltenen Fällen des Antriebs einer Gleichstromdynamo von einem Wechselstrommotor aus verwandt, wenn die Gleichstromdynamo mit einer Akkumulatorenbatterie verbunden ist. Alsdann läßt man die Gleichstromdynamo als Motor anlaufen, bringt die Wechsel- oder Drehstrommaschine auf die richtige Tourenzahl, entsprechend der Periodenzahl des Netzes, und schaltet sie dann unter Beobachtung der beim Parallelschalten der Dynamos besprochenen Vorsichtsmaßregeln ein. Der Vorzug des Synchronmotors ist dann freilich, daß er die Umwandlung elektrischer in mechanische Energie bei einem Leistungsfaktor gleich eins vornehmen kann.

Bei Drehstrom sind die normalen Motoren die Asynchron- oder Induktionsmotoren, auch einfach Drehstrommotoren genannt, die auf dem Ferrarisprinzip beruhen. Nur wird nicht ein Metallzylinder oder eine Metallscheibe wie bei den Instrumenten verwandt, sondern ein Anker aus Dynamoblechen, in dessen Nuten bei der einfachsten Konstruktion direkt miteinander verbundene Kupferstäbe gelegt sind, Käfiganker genannt (s. Abbildung 58, 59 u. 60), oder auch Wicklungen, die wie bei den Generatoren aus Spulen zusammengesetzt und mit Schleifringen verbunden sind. Bei Lauf sind aber auch diese in sich verbunden oder kurzgeschlossen. Der Anker wird bei diesen Motoren auch Rotor oder Läufer genannt. Schon bei den Ferraris-Instrumenten wurde darauf hingewiesen, daß auf alle derartigen Ankergebilde ein Drehmoment ausgeübt wird, wenn wenigstens 2 magnetische Wechselfelder vorhanden sind, die von 2 in ihrer Phase gegeneinander verschobenen Wechselströmen erzeugt werden. Besonders in Amerika

hat man auch früher vielfach Generatoren und Motoren nur für 2 verschiedene Wechselströme oder für Zweiphasenstrom gebaut; man brauchte aber zu ihrer Verteilung mindestens 3 Leitungen, 2 Zu- und eine gemeinschaftliche Rückleitung. In Europa erkannte man früher, daß das Drehmoment noch gleichmäßiger wurde, ohne daß mehr Leitungsdrähte zu verwenden waren, wenn man durch 3 rings um den Anker gleichmäßig verteilte Wicklungen 3 gleiche, in ihrer Phase um genau gleich viel verschobene Ströme, also Drehstrom sandte. Jede Wicklung eines Ständers eines Drehstromgenerators kann prinzipiell auch als Ständerwicklung eines Asynchronmotors dienen. Das Feld, das von Strom 1 in Spule 1 in einem Moment erzeugt wird, wird im Raume gedreht, sonst aber vollständig gleichartig und gleichgroß von dem Strom in Spule 2 nach Verlauf von $\frac{1}{6}$ Periode erzeugt, dazwischen ist freilich ein magnetisches Feld (z. B. im Moment II) vorhanden, das zwar schon gedreht gegen I, aber von etwas anderer Gestalt ist. Sind die Wicklungen aber genügend verteilt und besitzt auch der Strom eine passende Kurvenform (eine sinusförmige), so ist sogar jederzeit dasselbe Feld vorhanden nach Größe und Form, das nur seine Lage im Raume andauernd ändert, nämlich sich dreht, also ein Drehfeld. Obgleich die magnetische Energie nun augenscheinlich sich nicht mehr zeitlich ändert, da ja stets das gleiche magnetische Feld vorhanden ist, so werden doch elektrische Spannungen in den Rotorleitern, die zunächst noch als stillstehend gedacht werden mögen, induziert, weil die magnetische Energie innerhalb einer Rotorwindung sich fortwährend ändert. Für das Problem der Induktion ist es aber gleichgültig, ob sich die magnetische Energie innerhalb einer feststehenden Spule ändert durch Änderung des Feldes oder ohne Änderung des Feldes durch Bewegung der Spule, oder hier beim Anlauf des Asynchronmotors ebenfalls ohne Änderung des Feldes durch dessen Drehung bei stillstehenden Spulen. Die induzierten Ströme erzeugen nun mit dem Magnetfeld ein solches Drehmoment, daß der Rotor in Richtung des umlaufenden Drehfeldes mitgenommen wird. Würde der Rotor bis zu vollständigem Synchronismus mit dem umlaufenden Drehfelde gelangen, so würde die magnetische Energie innerhalb einer Rotorwindung sich nicht mehr ändern, also auch keine Energie mehr in mechanische umgewandelt werden können, d. h. es würde vom Rotor gar kein Drehmoment entwickelt werden. Selbst bei Leerlauf, wo doch zur Überwindung der Reibung auch schon ein



Abb. 59. Drehstrommotor mit Schleifringen, 135 P.S., 3000 Volt, 1000 Umdrehungen pro Minute bei einer Periodenzahl = 50; auseinandergenommen. Fabrikat der Siemens-Schuckert-Werke, Berlin.



Abbildung 60. Rotor zu einem Fördermotor für Drehstrom: 1235 P.S. maximal, 375 Umdrehungen pro Minute, 50 Perioden. 3 Nuten pro Pol und Phase. Fabrikat der Siemens-Schuckert-Werke, Berlin.

kleines Drehmoment entwickelt werden muß, erst recht aber bei Belastung bleibt der Rotor daher hinter dem umlaufenden Drehfelde zurück: er „schlüpft", und zwar je größer die Belastung, um so mehr. Die Schlüpfung beträgt aber bei normaler Belastung nicht mehr als etwa 5 % bei kleinen und 3 % bei großen Maschinen. Die Ströme, die im Rotor fließen, sind ebenfalls Wechselströme; wird sich nun, so fragen wir, nicht auch um sie ein magnetisches Feld bilden und sich dessen magnetische Energie wie etwa bei der Kommutation der Gleichstrommaschinen unangenehm bemerkbar machen? Da ist nun zu berücksichtigen, daß die Leiter im Stator ein magnetisches Feld bilden, das sich gleichmäßig durch Stator und Rotor erstreckt. Ströme, die im Rotor fließen, bilden aber ihr magnetisches Feld fast genau in demselben Raume; ganz genau würde das zutreffen, wenn man die Spulen dicht an den Luftspalt legte und diesen ganz klein machen würde. Wenn nun im Rotor die Ströme mit der Belastung zunehmen, so müssen auch die Ströme im Stator zunehmen; das ist nach dem Energieprinzip ohne weiteres nötig. Es muß doch im Stator eine größere Energie zugeführt werden, und das ist bei konstanter Spannung durch Vergrößerung der Stromstärke möglich. Nimmt nun, so fragen wir, die magnetische Energie im Motor dadurch gleichzeitig zu? Für den idealen Fall, daß Stator- wie Rotorströme genau in demselben Raume gleichgestaltete magnetische Felder erzeugen würden, ist die Antwort: Nein! Die genauere Überlegung zeigt dann folgenden physikalischen Vorgang: es wird durch die Statorwindungen elektrische Energie zugeführt und in magnetische Energie im Stator und Rotor verwandelt; gleichzeitig wird aus dem Vorrat an magnetischer Energie solche entnommen und in mechanische Energie im Rotor umgesetzt. Das Quantum an magnetischer Energie im Motor, die doch die ganze Umwandlung vermittelt, bleibt dabei konstant! Es ist, als wenn in ein Reservoir von der einen Seite Energie hineingepumpt, auf der anderen Seite abgezapft würde, ohne daß sich der Inhalt änderte.

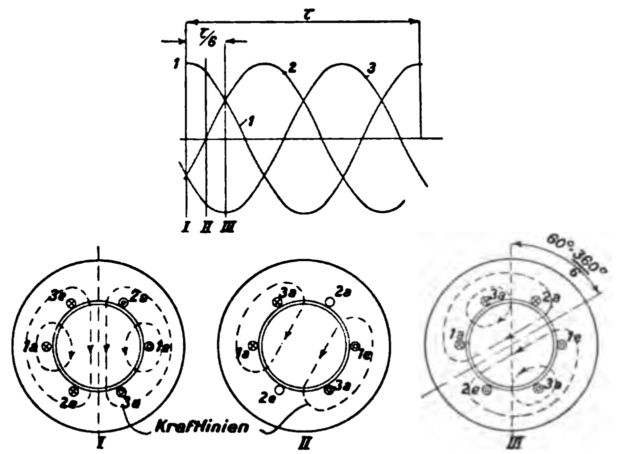


Abbildung 61. Entstehung eines Drehfeldes.

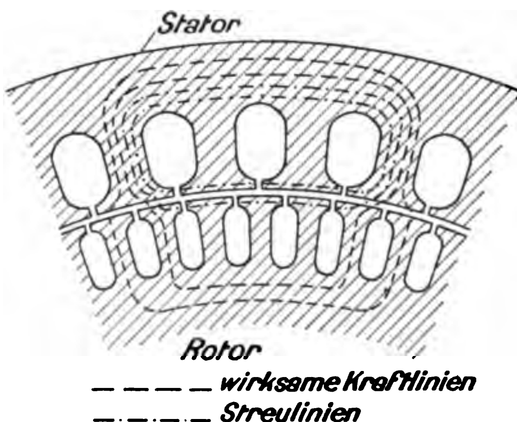


Abbildung 62. Verlauf einiger Kraftlinien in einem Drehstrommotor.

Die Streuung. Freilich trifft dies nur in dem idealen Falle zu. In Wirklichkeit wird ein Teil des magnetischen Feldes der Statorströme derart verlaufen (vgl. Abbildung 62), daß unmöglich die Rotorwindungen ihm Energie entnehmen können, weil dazu unbedingt erforderlich ist, daß die magnetischen Kraftlinien durch die Rotorwindungen hindurchgehen. Alle Kraftlinien nun, die das nicht tun, nennt man Streulinien. Schicken wir also in den Stator

Energie hinein, so wird ein Teil derselben als magnetische an Stellen des Raumes angesammelt, aus denen sie sofort in mechanische Energie des Rotors weiterverwandelt werden kann. Ein anderer Teil wird auch als magnetische Energie, aber abseits von den Rotorwindungen aufgestaut und wieder an das Netz zurückgeliefert. — Dies ist das Problem der Streuung, das nicht nur bei diesen Asynchronmotoren, sondern auch bei den Transformatoren eine wenn auch nicht ganz so große Rolle spielt. Die Charakterisierung eines guten Strom- oder Spannungstransformators, daß ein Blechpaket ohne Fugen dicht mit 2 Spulen, der primären und der sekundären, übereinander bewickelt werden soll, heißt nichts anderes, als daß solche Transformatoren keine Streuung besitzen sollten. Die Streuung ist danach kein Verlust an Energie, da ja die magnetische Streuenergie an das Netz zurückgeliefert wird, aber sie bedeutet eine geringere Umsetzung von elektrischer in eine bestimmte andere Form (beim Drehstrommotor in mechanische, beim Transformator wieder in elektrische), als im idealen Falle möglich ist.

Konstruktive Maßregeln gegen die Streuung sind die möglichste Verkleinerung des Luftzwischenraums zwischen Stator und Rotor, die Verwerfung geschlossener Nuten bei den Asynchronmotoren, damit sich keine Kraftlinien direkt um sie herum bilden können, während solche Nuten aus anderen Gründen von Vorteil sein würden, Verringerung der vorstehenden sogenannten Spulenköpfe und Ausbildung eines jederzeit möglichst gleichmäßigen Feldes, das von den Stator- und den Rotorströmen allein gebildet wird. Das sind die vier Bedingungen, die man konstruktiv zu erfüllen hat, soll ein möglichst großer Teil der überhaupt im Motor vorhandenen magnetischen Energie in mechanische umgesetzt werden.

Drehmoment des Drehstrommotors. Eine Folge der Streuung ist es, daß die Drehstrommotoren die Eigenschaft besitzen, bei zunehmender Schlüpfung, d. h. zunehmenden Strömen zunächst zwar ein immer zunehmendes Drehmoment zu zeigen, aber der mit wachsender Schlüpfung oder wachsendem Strom hinzukommende Teil an umwandlungsfähiger Energie wird immer kleiner, weil mit wachsenden Strömen immer mehr Energie in den Streufeldern aufgestaut wird. Bei einer bestimmten Schlüpfung wächst das Drehmoment dann überhaupt nicht mehr, belastet man den Motor also noch mehr, so bleibt er mit einem Male stehen (Abbildung 63a).

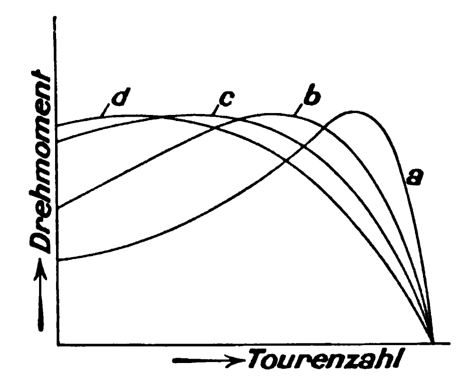


Abbildung 63. Drehmoment eines Drehphasenmotors ohne und mit eingeschaltetem Widerstand im Rotor. Die Kurven treffen sich im praktisch nicht erreichbaren Punkt des Synchronismus.

Der Leistungsfaktor der Drehstrommotoren. Die Darstellung, daß in einen Drehstrommotor von der einen Seite Energie hineingeschickt, von der anderen Seite Energie herausgenommen würde in Gestalt mechanischer Energie, während die im Motor vorhandene Energie annähernd konstant bliebe, jedenfalls beim idealen Motor, bedarf einer Ergänzung: es ist ja nicht eine Leitung, sondern drei, durch die jene Energie, und zwar in Form wechselnder Spannungen und Ströme, zugeführt wird. Selbst wenn also gar keine Energie umgewandelt wird, etwa bei Leerlauf des Motors, wenn wir ein reines Drehfeld und also

konstante magnetische Energie im Motor haben und die Streuenergie vernachlässigen können, dann wird freilich von allen drei Leitungen zusammen nur die kleine Energie zur Deckung der Verluste im Motor zu liefern sein, jede Leitung für sich betrachtet liefert aber jederzeit einen Beitrag zu der konstanten magnetischen Energie oder gibt einen Teil wieder an das Netz ab, da jede Leitung ja von Wechselströmen durchflossen wird. Was also oben gesagt wurde, gilt nur von allen drei Leitungen zusammengenommen, nicht von jeder einzeln. Wenn aber jede Leitung einzeln bei Leerlauf nur den dritten Teil zur Deckung der Verluste, außerdem aber bald magnetische Energie an den Motor abgibt, bald solche aus ihm empfängt, so muß jede der drei Leitungen bei Leerlauf einen sehr kleinen Leistungsfaktor zeigen. Mit zunehmender Belastung steigt zunächst stark die umgewandelte Energie, eben außer zur Deckung der Verluste zur Deckung der mechanischen Leistung, der Leistungsfaktor wächst also. Mehr und mehr aber macht sich mit steigenden Strömen die nicht umsetzbare Energie der Streuung bemerkbar: der Leistungsfaktor erreicht ein Maximum in der Größenordnung von 0,9, um dann wieder abzunehmen.

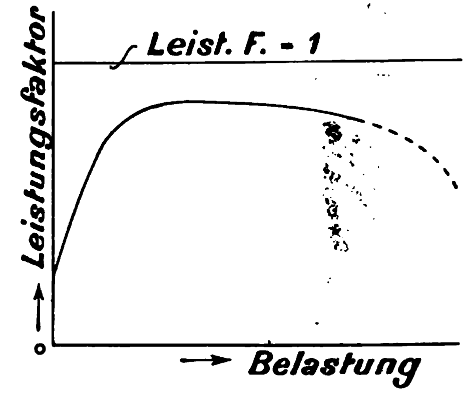


Abbildung 64. Leistungsfaktor eines Drehstrommotors.

Das Anlassen der Drehstrommotoren. Kleine Motoren mit Kurzschlußanker schaltet man einfach an das Netz an, sie laufen dann mit recht großem Anlaufstrom an, wenn das zu entwickelnde Drehmoment nicht zu groß ist. Von den meisten Elektrizitätswerken werden Motore ohne Anlasser bis zu 5 oder 7 P.S. gestattet. Bei den größeren Motoren würden die Ströme für die Motoren selbst und anderseits für das Netz zu groß werden; die Wicklungen könnten zu heiß oder der Spannungsabfall im Netz für die anderen Konsumenten zu beträchtlich werden. Man schaltet deshalb in den Rotor Widerstand ein, den man durch Bürsten und Schleifringe mit den Wicklungen verbindet. Dies hat den Vorteil, daß das Drehmoment, das wegen der sehr großen Streuungsenergie bei sehr großen Strömen nur gering sein würde, bei den kleinen Strömen bei eingeschaltetem Widerstand besser wird. Trotz der Verluste im Widerstand kann immer noch mehr Energie in mechanische umgesetzt werden als bei den großen Strömen ohne Widerstand (vgl. Kurve b, c und d in Abbildung 60).

Abbildung 65a. Schematische Darstellung der Görgesschaltung.

Außer der gewöhnlichen Anlaßmethode durch Einschalten von Widerstand im Rotor gibt es noch eine Menge anderer Konstruktionen, die meist Schleifringe und Bürsten zu vermeiden suchen. Eine von Görges angegebene Methode beruht z. B. darauf,

daß er zwei Wicklungen im Rotor gegeneinandersdhaltet beim Anlassen, was dasselbe ist, als ob eine Wicklung von der Differenz der beiden Windungszahlen, aber mit dem ganzen Widerstand vorhanden wäre, die Ströme können daher in beliebigen Grenzen gehalten werden. Kommt der Motor „auf Touren", so wird jede Wicklung in sich kurz geschlossen, mittels eines durch Zentrifugalkraft bei einer bestimmten Tourenzahl betätigten Schalters. Die Wirkung jeder Wicklung entspricht dann ihrer eigenen Windungszahl und ihrem Widerstand allein.



Abbild. 65b. Rotor zu einem Görges-Motor. Der Zentrifugalschalter ist links mit einem Schutzkasten umgeben.

Der Einphasenasynchronmotor. Für den einfachen Wechselstrom kennen wir den normalen Motor heute noch nicht. Wir sahen: der einphasige Synchronmotor ist es nicht, da er kein Drehmoment bei Stillstand entwickelt. Es gibt auch einen einphasigen Asynchronmotor, aber auch diesem können wir das Prädikat des normalen Motors nicht erteilen. Seine Konstruktion ist durch folgende Angaben in einfacher Weise charakterisiert; man stecke in den Ständer eines Einphasengenerators einen Käfiganker (Abbildung 58) oder einen mit entsprechend vielen Polen gewickelten „Phasenanker" hinein. Führt man nun der einzigen Wicklung im Ständer Wechselstrom zu, so kann ein Drehmoment an ihm niemals entstehen. Das geht schon aus den Bemerkungen über die Ferraris-Instrumente hervor. Bringt man ihn aber durch mechanischen Antrieb erst annähernd auf „Synchronismus" (es ist nicht genauer Synchronismus wie bei den Synchronmotoren nötig) und schaltet man dann erst den Wechselstrom durch einfaches Schließen eines Schalters ein, so entwickelt der Anker bei gleichzeitiger Schlüpfung ein Drehmoment. Also würde er genau wie ein Synchronmotor Verwendung finden können, mit dem Vorteil einfacheren Einschaltens, nur hat der Asynchronmotor den Nachteil, daß er wie der asynchrone Drehstrommotor einen sehr kleinen Leistungsfaktor bei Leerlauf hat, der auch bei keiner Belastung den Wert 1 erreicht. Er kann aber nach einer anderen Richtung hin durch einen Kunstgriff den Synchronmotoren gegenüber verbessert werden, nämlich in bezug auf die Inbetriebsetzung: man kann dafür eine besondere Hilfswicklung in dem Ständer oder Stator vorsehen, der man einen phasenverschobenen Strom zuführt. Diese Phasenverschiebung kann man etwa gerade wie bei den Ferraris-Instrumenten mit Hilfe einer Spule mit starkem Magnetfeld (Selbstinduktion) erzeugen, bisweilen werden auch Kondensatoren

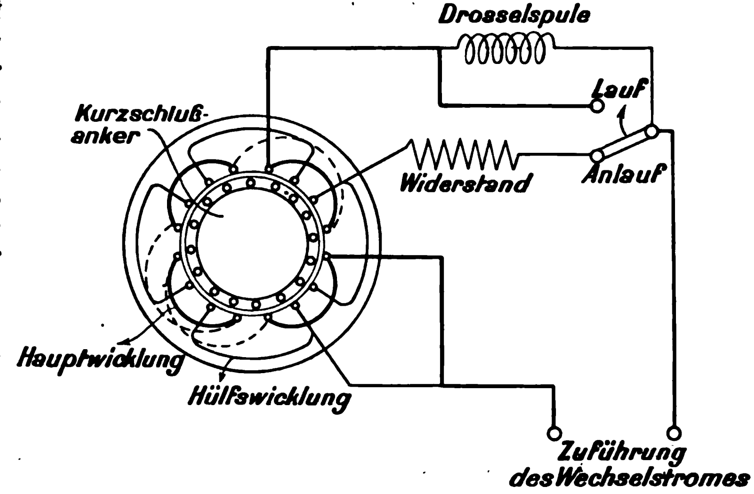


Abbildung 66. Schaltungsschema eines asynchronen Einphasenmotors.

verwendet.* Das so zu erzielende Drehmoment ist aber stets sehr gering, so daß gerade nur der Motor selbst „auf Touren" gebracht werden kann. Er muß dann eine Leerlauf- und eine Arbeitsriemenscheibe erhalten, man muß ihm also nach dem Anlauf plötzlich die Belastung aufwerfen, was oft recht mißlich ist. Vorher muß nach erfolgtem Anlauf außerdem eine Umschaltung erfolgen, da die Hilfswicklung für den normalen Betrieb auszuschalten ist, weil sie nur unnütze Verluste herbeiführen würde.

Trotzdem hat man sich früher in vielen Städten mit Wechselstromnetzen mit derartigen Motoren, die also nicht einmal den Grundforderungen an einen Elektromotor entsprechen, begnügt. Man hielt den Vorteil, nur zwei Leitungen verlegen zu müssen, für ausschlaggebend, wenn es sich um Städte handelte, deren Energiebedarf hauptsächlich in ihrem Lichtkonsum lag, deren Größe oder Ausdehnung aber eine Transformierbarkeit der Energie wünschenswert machte. Heute aber, wo alle Städte gerade auf die Verteilung elektrischer Energie zu Kraftzwecken im Interesse einer gleichmäßigen Belastung ihrer Zentrale und im Interesse ihrer Bürger den größten Wert legen, werden Zentralen mit einfachem Wechselstrom für Städte nicht mehr gebaut. Darin könnte erst durch die weitere Ausbildung des im folgenden beschriebenen Motors oder die Auffindung eines neuen Prinzips für einen solchen eine Änderung herbeigeführt werden.



Abbildung 67. Wechselstrom-Kommutatormotor für konstante Tourenzahl der Allgem. Elektrizitäts-Gesellschaft, Berlin.

Der Wechselstrom-Kommutatormotor. Derjenige Motor, der sich neuerdings als der normale für einphasigen Wechselstrom ausbilden zu wollen scheint, ist der Wechselstrom-Kommutatormotor. Er besitzt einen ringförmigen Ständer, der große Ähnlichkeit mit dem Ständer eines Asynchronmotors hat, und einen Anker, der bis auf Einzelheiten der Wicklung konstruktiv derselbe wie der einer Gleichstrommaschine ist. Aber gerade in den Wicklungen, Schaltungen und daher der Wirkungsweise ist eine außerordentlich große Mannigfaltigkeit möglich und tatsächlich auch schon vorhanden. Die große Mehrzahl solcher Motoren wird heute für verschiedene Tourenzahl und Drehrichtung für Bahnzwecke gebaut, von denen später zu sprechen ist. Aber auch für normale Zwecke sind solche Motoren entwickelt, doch kann man heute noch nicht von einer Standard-Type wie beim Gleichstrom-Nebenschlußmotor sprechen, haften doch auch allen Wechselstrom-Kommutatormotoren bedeutende Mängel an, die wahrscheinlich niemals ganz überwunden werden können. Jederzeit wird für normale Zwecke bei Verwendung von Wechselströmen der Drehstrommotor siegreich das Feld behaupten. Außer der großen Mannigfaltigkeit der Konstruktionen sind aber auch die elektrischen Vorgänge im einzelnen schon so kompliziert, daß ihre Erläuterung über den Rahmen dieses Buches hinausgehen würde. Nur auf die Idee eines Wechselstrom-Kommutatormotors mit konstanter Tourenzahl, sowie auf die aus der Idee sofort zu erkennenden Schwierigkeiten soll hier kurz eingegangen werden.

Würde man einen Gleichstrom-Nebenschlußmotor mit Wechselstrom so speisen können, daß die Ströme und also auch die Felder phasengleich wären, so würde er

* Dies ist fast der einzige Fall, in dem Kondensatoren im elektrischen Maschinenbau angewandt werden.

sich genau wie ein normaler Gleichstrommotor verhalten, nur würde das Drehmoment hundertmal in der Sekunde seine Stärke, aber eben nie seine Richtung ändern. Derartige Konstruktionen werden ja wirklich, wie wir gesehen haben, in der Zählertechnik ausgeführt, und die betreffenden Zähler arbeiten zu vollständiger Zufriedenheit genau so gut für Gleichstrom wie für Wechselstrom. Ja, auch die Wattmeter waren auf dem selben Prinzip aufgebaut. Die Konstruktion dieser Apparate läßt sich aber auf Motoren zur Umsetzung elektrischer Energie nicht übertragen. Denn wollte man, wie beim Wattmeter, die Phasengleichheit durch vorgeschaltete Widerstände erreichen, so würde der Wirkungsgrad ein sehr schlechter werden.

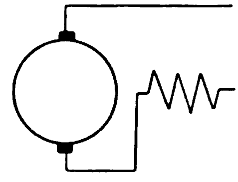


Abbildung 68. Schaltung eines Hauptstrommotors.

Aus diesem Grunde ist die einfache Umgestaltung des Nebenschluß-Gleichstrommotors für Wechselstrom ausgeschlossen. Auch die magnetische Energie des Ankers, die ja nun nicht mehr, wie im Gleichstrommotor, konstant bleibt, schien zunächst Schwierigkeiten zu bereiten. Als weiteres Übel zeigt sich vor allem aber noch die verwickeltere Kommutation. Geradeso wie bei den Gleichstrommaschinen haben wir auch hier die Forderung, daß die magnetische Energie der Spule, die gerade unter einer Bürste hinweggleitet, verschwindet und sich im nächsten Moment mit entgegengesetzter Wirkungsrichtung wieder aufbaut. Da aber nun sämtliche Ströme Wechselströme sind, können und werden in der kurzgeschlossenen Spule auch noch andere Energiemengen durch „Induktion“ oder „Transformation“ übertragen werden.

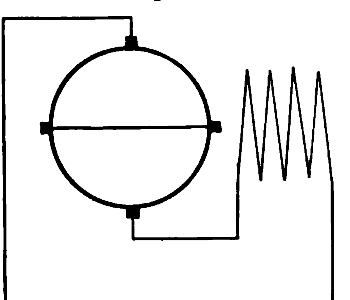


Abbildung 69. Schaltungsschema des Wechselstrom-Kommutatormotors beim Anlauf.

Die erste Schwierigkeit, nämlich im Anker und in der parallelgeschalteten Feldwicklung phasengleiche Ströme zu erzielen, ist für den Anlauf der Motoren überhaupt noch nicht gelöst. Man umgeht sie, indem man beide Wicklungen beim Anlauf hintereinanderschaltet, der Strom und die von ihm erzeugten Magnetfelder sind dann natürlich phasengleich. Die einfachste Schaltung wäre die nach Abbild. 68. In Wirklichkeit liegen noch zwei weitere Bürsten auf dem Kommutator, die direkt miteinander verbunden sind. Dadurch werden im Anker weitere Ströme induziert, genau wie in einem Transformator, welche den Strömen in dem feststehenden Ständer entgegengesetzt gerichtet sind. Das magnetische Feld der Ströme im Ständer wird dadurch zum größten Teil aufgehoben oder „kompensiert“. Das Eigenartige dieser Maschinen ist daher, daß durch die Ströme des rotierenden Teils das magnetische Feld erzeugt wird, während der feststehende Teil die arbeitleistenden Ströme führt.

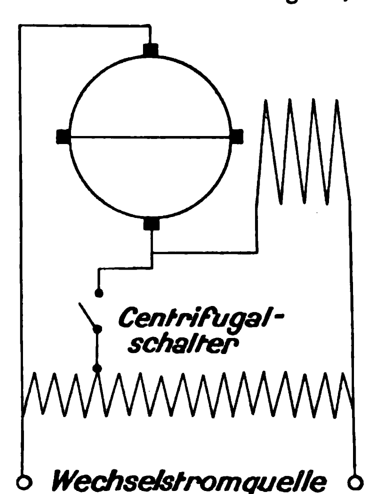


Abbildung 70. Schaltungsschema eines Wechselstrom-Kommutatormotors bei Lauf mit konstanter Tourenzahl.

In allen Wechselstrom-Kommutatormotoren können so störende magnetische Felder kompensiert werden durch eine möglichst naheliegende, in sich geschlossene Windung. Eine zweite Art der „Kompensation“ gibt es, wenn man durch nahegelegene Spulen Ströme von entgegengesetzter Richtung besonders hindurchleitet.

Dann kann der eine Strom die magnetische Wirkung des anderen annähernd aufheben. Auch dieses Prinzip wird bei Wechselstrom-Kommutatormotoren angewandt.

Sobald nach Schaltung 69 der Motor angelaufen und auf eine bestimmte Tourenzahl gekommen ist, wird er durch einen Zentrifugalschalter nach Abbildung 70 umgeschaltet. Durch den neu zugeschalteten Apparat, einen Autotransformator (s. S. 295), ändert sich die Verteilung der Klemmenspannung auf den feststehenden und den rotierenden Teil nicht mehr merklich, geradeso, wie auch das Feld und der Anker des Gleichstrom-Nebenschlußmotors eine stets gleichbleibende Spannung aus dem Netz geliefert erhält. Auch die Tourenzahl dieses Kommutatormotors ändert sich alsdann nur geringfügig bei zunehmender Belastung. Die Schaltung 71 erreicht das gleiche Ziel.

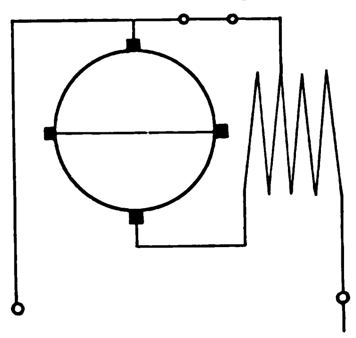


Abbildung 71. Andere Schaltung eines Wechselstrom-Kommutatormotors für konstante Tourenzahl.

Diese Motoren wirklich brauchbar für den Betrieb herzustellen, gelang erst nach Überwindung der dritten Schwierigkeit, der der Kommutation. Immerhin ist ein entsprechend gutes Arbeiten und ein gleich guter Wirkungsgrad (vgl. Abbildung 88) wie bei Gleichstrommaschinen noch nicht erreicht und wohl auch nicht erreichbar, so daß die Vorherrschaft des Drehstrommotors für normale Zwecke bei Wechselstrom vorderhand noch nicht so bald gebrochen werden wird.

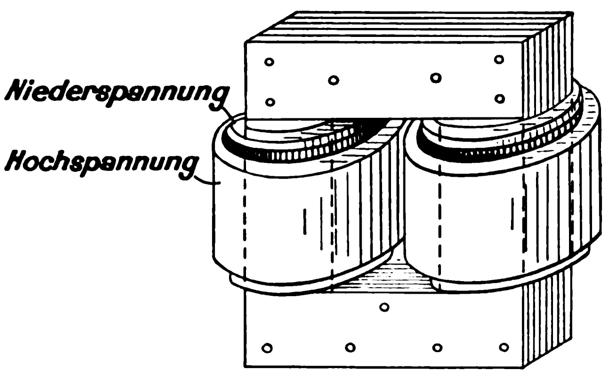


Abbildung 72. Schematische Darstellung eines Kerntransformators mit Zylinderwicklung.

DIE TRANSFORMATOREN UND UMFORMER. Der Wechselstromtransformator, der elektrische Energie wieder in elektrische, nur von anderer Spannung, umformt, ist die mechanisch einfachste Konstruktion unter den elektrischen Maschinen, die auch am leichtesten in ihren Eigenschaften zu übersehen ist. Ein Wechselstromtransformator besteht stets aus einem Paket aus lamellierten Eisenblechen, auf das zwei Spulen oder Spulengruppen, die primären und die sekundären, über- oder nebeneinander aufgeschoben sind. Die Windungszahlen verhalten sich wie das Übersetzungsverhältnis der Spannungen. Da sich die Ströme umgekehrt verhalten, stehen auch die Kupferquerschnitte, durch die sie fließen, meist im umgekehrten Verhältnis der Spannungen, und da sich aus Windungszahl und Querschnitt bei gleicher Länge einer Windung der primären und sekundären Wicklung das Kupfervolumen ergibt, ist dies für die sekundären und primären Spulen immer annähernd dasselbe. Nur ist natürlich die Spule für die höhere Spannung stärker isoliert.

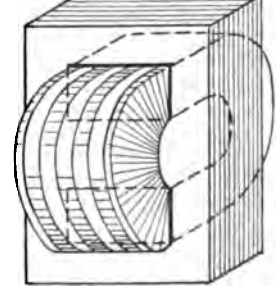


Abbildung 73. Schematische Darstellung eines Manteltransformators mit Scheibenwicklung.

Das Blechpaket ist meist entweder nach Figur 72 geformt, so daß die Spulen auf das lamellierte Blechpaket als Kern aufgeschoben werden (Kerntransformatoren), oder nach Abbildung 73, so daß das Eisen als Mantel um die Spulen gelegt wird (Manteltransformatoren). Das Eisen, in dem

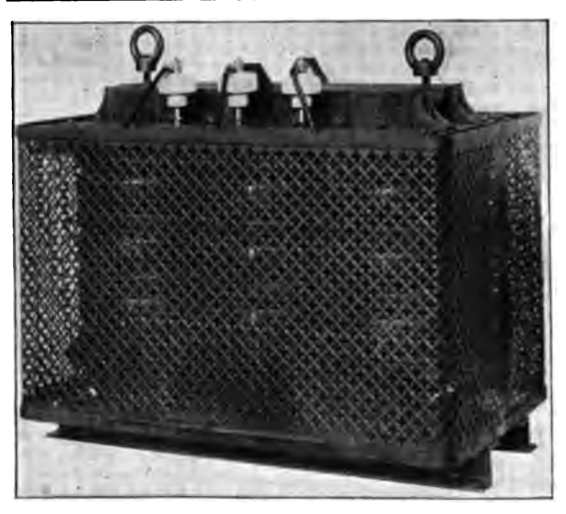


Abbildung 74. Luftgekühlter Drehstromtransformator der Bergmann El. Werke, Berlin.

sich hauptsächlich das magnetische Feld ausbildet, ist jedenfalls zu den Spulen immer wie ein Kettenglied zum anderen angeordnet. Wenn die Spulen als Zylinder übereinander angeordnet sind, so spricht man von Kern- oder Manteltransformatoren mit Zylinderwicklung; sind primäre und sekundäre Spulen von gleicher Größe und immer abwechselnd nebeneinander angeordnet, so spricht man von Transformatoren mit Scheibenwicklungen (Abbildung 73).

Ein dritter Gesichtspunkt, nach dem man die Transformatoren unterscheidet, ist der der Kühlung. Die bei der Umsetzung verlorengehende Energie, die als Wärme wiedererscheint, wird entweder an die Luft direkt abgegeben oder zunächst an Öl (Öltransformatoren), das die Wärme weiter an die Luft oder an besonderes Kühlwasser abgeben kann. Die letztere Art der Kühlung (vgl. Abbildung 76), bei der Wasser durch Kühlschlangen oberhalb des Transformators an den Stellen höchster Erwärmung dauernd strömt, ist die intensivste und wird daher bei sehr großen Einheiten verwendet, wenn die Abkühlung am schwersten ist. Denn die Verluste steigen bei gleicher Beanspruchung des Materials mit dem Volumen, also der dritten Potenz der linearen Dimensionen, die abkühlende Oberfläche nur mit dem Quadrat.

Die Wirkungsweise beruht, wie schon früher erwähnt, auf der Übertragung von elektrischer Energie mit der Zwischenform der magnetischen. Entnehme ich der sekundären Spule eines Transformators zunächst gar keine Energie, so fließt durch die primäre Spule bei angelegter Spannung ein Wechselstrom, der ein magnetisches Feld erzeugt, und zwar wechselt das magnetische Feld im allgemeinen hundertmal in der Sekunde seine Intensität und Richtung, oder es pulsiert mit 50 Perioden. Entsprechend der angelegten Spannung wird aus dem Netz in einer hundertstel Sekunde also Energie als magnetische, und zwar fast ausschließlich im Eisen angesammelt, im nächsten Hundertstel wieder abgegeben, und zwar an das Netz zurück. Sobald man auch sekundär Energie entnimmt, z. B. mehr oder weniger Glühlampen anschließt, ist auch primär mehr Energie zuzuführen, aber wir finden auch hier, wenigstens bei einem sehr guten Transformator mit großer Annäherung, daß der Betrag der magnetischen Energie, auf dem die ganze Umsetzung beruht, im Mittel bei allen Belastungen konstant bleibt. Das Bild von dem Energiereservoir, das beim Drehstrommotor angewandt



Abbildung 75. Öltransformator, geschlossen, ohne Wasserkühlung. Fabrikat der Bergmann El. Werke, Berlin.

wurde, hat auch beim Transformator Gültigkeit als erste Annäherung. Korrigiert muß das Bild wieder deshalb werden, weil auch im Transformator natürlich Verluste an Energie entstehen, die sich in Wärme umsetzen, anderseits tritt auch hier die Streuung auf, genau wie beim Drehstrommotor, d. h. eine Aufspeicherung magnetischer Energie an Stellen im Raume, aus denen die sekundäre Wicklung sie nicht in elektrische zurückverwandeln kann; nur ist die Streuung beim Transformator wegen des geschlossenen Eisenpakets viel geringer.

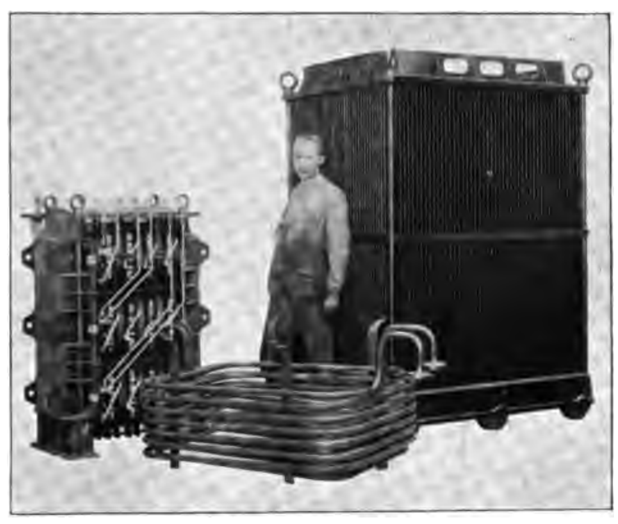


Abbildung 76. Öltransformator mit Wasserkühlung, auseinandergenommen, der Bergmann El. Werke, Berlin.

Transformatoren für Drehstrom besitzen Kerne nach Abbildung 77 oder auch 78. In den drei Kernen bilden sich durch die Ströme Magnetfelder, die gegeneinander zeitlich genau wie die Ströme nach Abbildung 16 verschoben sind. Geradeso wie die drei Wechselströme des Drehstroms aber durch drei Drähte fortgeleitet werden, so genügen auch drei Kerne für den Drehstromtransformator, da sich die Kraftlinien zweier Kerne stets zusammen als die Fortsetzung der Kraftlinien des dritten ergeben.

Ist es nicht notwendig, daß die Niederspannung von der höheren Spannung vollständig getrennt ist, weil auch die höhere Spannung nicht gefährlich werden kann, so kann man zu dem Autotransformator greifen. Er entsteht dadurch, daß man als Niederspannungswicklung eine entsprechend große Anzahl Windungen der Hochspannungswicklung selbst benutzt, die nur einen stärkeren Kupferquerschnitt erhalten. Man spart dadurch an Wickellohn, und ebenso kann man etwas weniger Kupfer verwenden und doch denselben Wirkungsgrad erreichen. Das Spannungsverhältnis zwischen a_1 a_2 und b_1 b_2 verhält sich wiederum wie die Windungszahlen zwischen diesen Punkten.

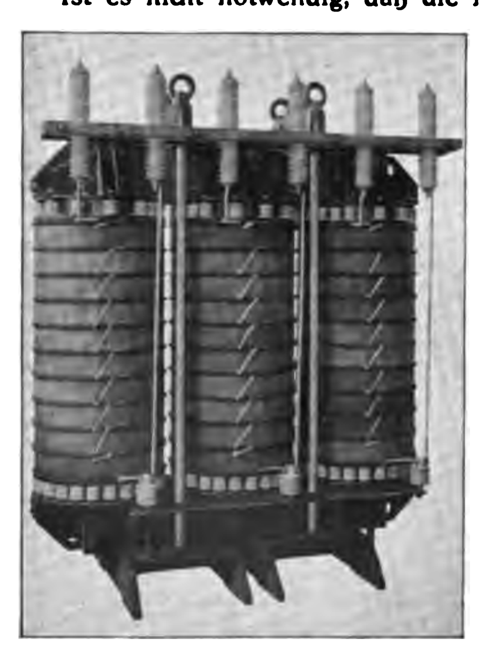


Abbildung 77. Aufbau eines Drehstromtransformators mit Zylinderwicklung der Bergmann El. Werke, Berlin.

Die Gleichstrom-Wechselstromumformer und Wechselstrom-Gleichstromumformer. Dies letzte der normalen Probleme der heutigen Elektrotechnik ist natürlich sehr einfach dadurch zu lösen, daß man einen normalen Motor mit einer normalen Dynamo mechanisch kuppelt. Dies geschieht auch häufig. Zur Umformung von Gleich- in Drehstrom kuppelt man z. B. einen Gleichstrom-Nebenschlußmotor mit einer Drehstromdynamo. Da wir gesehen haben,



Abbildung 78. Älterer Drehstromtransformator der Siemens-Schuckert-Werke, Berlin, im Aufbau.

daß sich beide Typen eigentlich nur durch den Kommutator der Gleichstrommaschine und die Schleifringe der Wechselstrommaschine zu unterscheiden brauchen, so kann man die Wicklungen beider Maschinen vereinigen, wenn man als Wechsel- oder Drehstromdynamo eine mit feststehenden Polen wählt. An der einen Seite des Ankers werden nur die Schleifringe, an der anderen der Kommutator angebracht. Dieses förmliche Ineinanderlegen der beiden Maschinen kann man sich aber natürlich nur vorstellen, wenn die Drahtzahl auf den Ankern der beiden getrennten Maschinen genau dieselbe war; es muß daher die Spannung des zugeführten Gleichstroms zu der des entnommenen Wechselstroms ein ganz besonderes Verhältnis in diesen Maschinen haben, die man als Einankerumformer bezeichnet. Durch die Verwendung von Transformatoren können aber die Einankerumformer leicht für alle Spannungen Verwendung finden. Ihr Nachteil ist der, daß die Nachregulierung der Spannung entsprechend dem Spannungsabfall im Netz nicht mehr möglich ist, weil die Spannung eben durch die Gleichstromspannung gegeben ist.

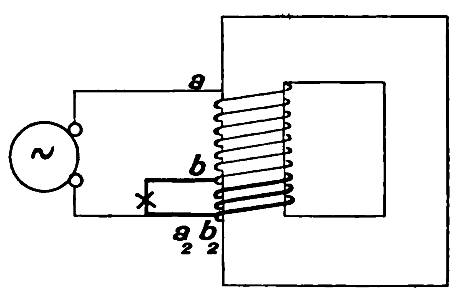


Abbildung 79. Schematische Darstellung eines Autotransformators.

Dasselbe ist natürlich der Fall, wenn man in einem solchen Einankerumformer rückwärts Wechselstromenergie in Gleichstromenergie verwandeln will, das in der Praxis häufigste Problem. Soll die Spannung nun variabel werden, so muß man entweder den Transformator so ausgestalten, daß er eine variable Spannung der Maschine zuführt, oder man läßt die Wechselströme auf ihrem Wege vom Transformator zum Einankerumformer noch Wechselstrom- oder Drehstromgeneratoren passieren (vgl. Abbildung 81). Wenn man die mit Gleichstrom erregten Magnetpole dieser Dynamos stärker erregt, so erzeugt man in ihnen eine zusätzliche Spannung zu derjenigen, die von den Transformatoren gegeben ist, und erhält dadurch auch eine entsprechend steigende Gleichstromspannung. Im übrigen verhält sich ein solcher Einankerumformer, welcher Wechselstrom



Abbildung 80. Einankerumformer für Zwei- u. Dreiphasenstrom für Laboratoriumszwecke. Ältere Schuckert-Type.



Abbildung 81. Einankerumformer der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft, Berlin, mit kleinerer Zusatzmaschine auf derselben Grundplatte zur Regulierung der Spannung.

in Gleichstrom verwandelt, genau so, als ob man einen Synchronmotor mit einer normalen Gleichstromdynamo in einer Maschine vereinigt hätte. Alle Nachteile, die daher von den Synchronmotoren (s. S. 285) erwähnt wurden, treten auch bei den Einankerumformern in diesem Falle auf, so daß für viele Fälle die Kuppelung eines Asynchronmotors mit einer Gleichstromdynamo vorgeschlagen wird. Eine besondere Konstruktion dieser Art (Ilgner-System) s. S. 310.

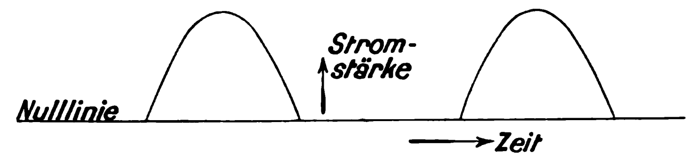


Abbildung 82. Gleichgerichteter Wechselstrom, die negative Hälfte ist unterdrückt.

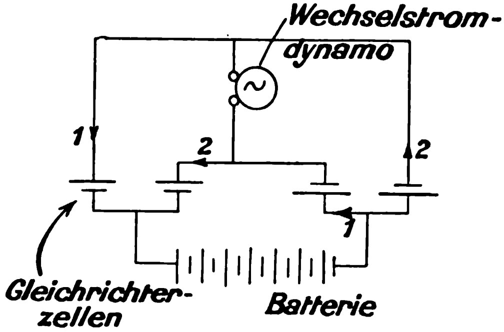


Abbildung 83. Schaltung von Gleichrichterzellen zum Laden einer Akkumulatorenbatterie durch eine Wechselstromdynamo.

An dieser Stelle soll noch ein Ersatz der eigentlichen Umformermaschine erwähnt werden, die „Gleichrichter", die einen Wechselstrom in einen veränderlichen, aber nur noch in einer Richtung fließenden Strom nach Abbildung 82 umwandeln. Ein solcher Strom würde aber genügen, um Akkumulatoren aufzuladen. Die chemische Umsetzung würde freilich auch von Moment zu Moment verschieden groß sein, dies ist aber für den Betrieb gleichgültig. Nur Wechselstrom ist vollständig ungeeignet zur Ladung von Akkumulatoren, da die im einen Moment gebildeten chemischen Verbindungen im nächsten Moment durch den in entgegengesetzter Richtung fließenden Strom wieder aufgehoben werden. Steckt man eine Aluminium- und eine Eisenplatte in bestimmte Lösungen, z. B. Kalium-Bichromat, und legt man eine Wechselspannung an Aluminium und Eisen, so geht fast ausschließlich nur in einer Richtung der Strom hindurch, und zwar, wenn Aluminium der negative Pol ist. Der Strom hat also annähernd die Form der Abbildung 82. Eine Zelle dieser oder ähnlicher Form nennt man eine „Grisson-Zelle" nach ihrem Entdecker. Durch Schaltung (Abbildung 83) erreicht man, daß tatsächlich Gleichstrom verschiedener Stärke oder pulsierender Gleichstrom durch die Akkumulatoren hindurchgeht. Diese Grisson-Gleichrichter, auch elektrolytische Gleichrichter genannt, halten den Strapazen eines normalen Betriebes nicht lange stand. Nun beobachtete Cooper-Hewitt, wenn er Wechselspannung an Quecksilbernäpfe einerseits, andererseits an Kohle oder andere Metalle in evakuierten Glasgefäßen anlegte und einen Lichtbogen in



Abbildung 84. Quecksilbergleichrichter der Westinghouse Cooper-Hewitt-Gesellschaft.

dem luftverdünnten Raum sich bilden ließ, daß ebenfalls der elektrische Strom nicht gern seine Richtung umkehrte, und daß sich durch geeignete Formgebung nach Abbildung 84 (Quecksilberpol unten, 2 abwechselnd tätige Pole aus anderem Metall seitwärts und einen Kühlraum oben) und eine geeignete Schaltung ein Gleichrichter sowohl für Wechsel- wie für Drehstrom entwickeln ließ. Diese Quecksilber-Gleichrichter arbeiten sehr lange Zeit zufriedenstellend und haben sich daher rasch für vielerlei Zwecke eingebürgert. Sie ersetzen, weil sie nicht rotieren und leicht zu bedienen sind, in vielen Fällen, wo es auf wirklichen Gleichstrom nicht ankommt, die komplizierteren Maschinenaggregate, da auch ihr Wirkungsgrad ein recht günstiger ist. Natürlich sind außer dem eigentlichen Gleichrichter doch noch einige Apparate erforderlich, die aber sämtlich nach Abbildung 85 und 86 fest eingebaut werden können.

Abbildung 85. Schalttafelrückseite für Quecksilbergleichrichter der Westinghouse Cooper-Hewitt-Gesellschaft.

DIE VERLUSTE IN NORMALEN ELEKTRISCHEN MASCHINEN UND IHR WIRKUNGSGRAD. In sämtlichen elektrischen Maschinen treten einmal Verluste in den Kupferleitern auf, und zwar als Erwärmung durch den Stromdurchgang. Sie steigen mit dem Quadrat der Stromstärke an. Nach dem Entdecker dieses Naturgesetzes spricht man von der in den Leitern entstehenden als der Jouleschen Wärme. Anderseits tritt überall im Eisen, wo sich der magnetische Zustand ändert, aus doppeltem Grunde ein Verlust ein. Stellt man sich das Magnetisieren des Eisens als ein Richten kleinster, stets im Eisen vorhandener Molekularmagnete vor, die im unmagnetischen Eisen vollständig ungeordnet sind, so ist ein Teil der Verluste erklärlich durch eine Reibung der kleinsten Teilchen bei dieser Richtung. Man nennt diesen Verlust den durch Hysterese (Nachhinken), weil durch diese Reibung der kleinsten Teile der magnetische Zustand des Eisens scheinbar hinter demjenigen zurückbleibt, den man bei der Stromstärke in der magnetisierenden Spule eigentlich erwartet; gerade wie die Reibung z. B. den Zeiger eines Instruments veranlaßt, immer hinter dem richtigen Werte etwas zurückzubleiben. In beiden Fällen sind die Werte zu hoch, wenn dort der Magnetismus, hier der Ausschlag des Zeigers abnimmt; umgekehrt zu tief, wenn diese Größen anwachsen. Die graphische Darstellung der Abhängigkeit des magnetischen Zustandes von der magnetischen Stromstärke ergibt die sogenannte Hystereseschleife (Abbild. 87), deren Größe die Reibungsarbeit bestimmt, die bei einer einzigen Ummagnetisierung in Wärme umgesetzt wird. Die gesamte umgesetzte Arbeit, der Hystereseverlust, wächst außerdem proportional der Anzahl der Ummagnetisierungen,

d. h. der Periodenzahl des magnetisierenden Wechselstroms oder der Umdrehungszahl der Anker, ferner natürlich mit dem Volumen oder Gewicht des magnetisierten Eisens.

Ummagnetisierungen des Eisens und damit Hystereseverluste treten nun ein in den ganzen Eisenpaketen der Transformatoren, den sämtlichen Eisenteilen der asynchronen und Wechselstrom-Kommutatormotoren, in den Ankern sämtlicher Dynamos und Motoren, wie leicht ersichtlich, und ebenso in deren Polschuhen. Letzteres hat darin seinen Grund, daß den Polschuhen stets Nuten und Zähne im Anker gegenüberstehen, so daß auch der magnetische Zustand der Polschuhe kein gleichmäßiger ist. Der Magnetismus in den Polschuhen ändert sich infolgedessen, sobald der Anker mit seinen Zähnen und Nuten rotiert. Die Anker der Asynchronmotoren haben bei Lauf nur sehr kleine Hystereseverluste, weil, wie früher erwähnt, der Anker fast dieselbe Geschwindigkeit wie das im Stator umlaufende Magnetfeld hat, er schlüpft nur mit 3—5 %, wird also nur $1^1/_2$—$2^1/_2$ mal pro Sekunde ummagnetisiert gegenüber 50 Ummagnetisierungen des Stators. Die zweite Art der Verluste im Eisen wird dadurch hervorgerufen, daß überall, wo sich der magnetische Zustand des Eisens ändert, in den umgebenden Leitern Ströme induziert werden. Ein solcher Leiter ist nun nicht nur das eingebettete Kupfer, in dem nach der Absicht des Konstrukteurs Ströme induziert werden sollen, sondern auch das Eisen selbst, das freilich schlechter leitet als Kupfer. Diese Ströme werden Wirbelströme genannt und bedeuten, da sie eine weitere Erwärmung des Eisens verursachen, einen Verlust an Energie. Wirbelstromverluste treten also überall auf, wo eine Veränderung des magnetischen Feldes und damit Hystereseverluste auftreten. Sie sind durch die Wahl des Materials oder eine geeignete Unterteilung des Eisens (Lamellierung) herabzudrücken, d. h. durch Herstellung des Eisenkörpers aus Blechen, die durch Seidenpapier voneinander elektrisch isoliert sind. Die Unterteilung hat naturgemäß senkrecht zu der Richtung zu erfolgen, in der die Ströme ohne sie hauptsächlich induziert werden würden, d. h. senkrecht zur Richtung der Kupferleiter. Die Unterteilung des Eisens in den Transformatoren, Ankern usw. (vgl. Abbildung 46, 72, 73) ist dann leicht zu verstehen.

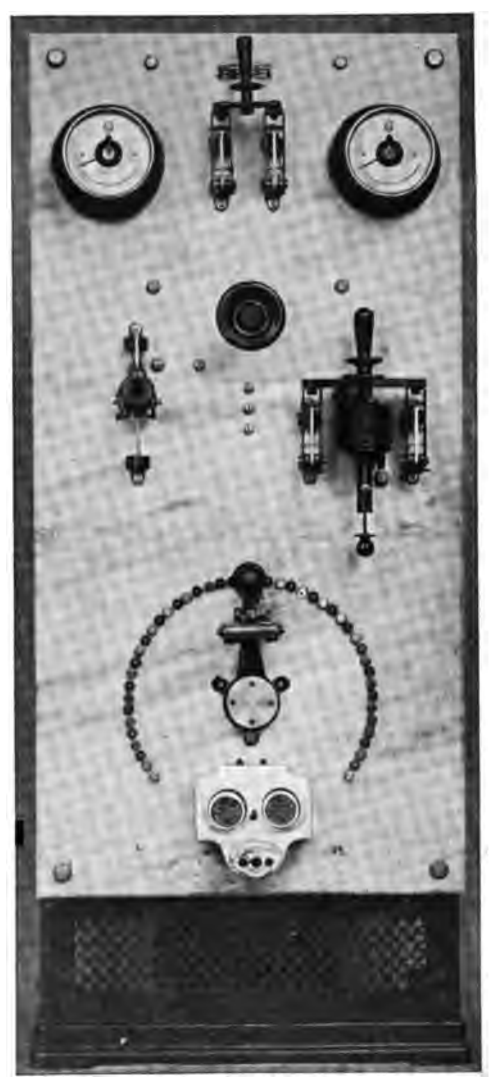


Abbildung 86. Vorderseite der Schalttafel für Quecksilbergleichrichter (Abbildung 85).

Außer den bisher genannten Verlusten kommen bei allen rotierenden Maschinen noch diejenigen durch Luft-, Lager- und Bürstenreibung hinzu.

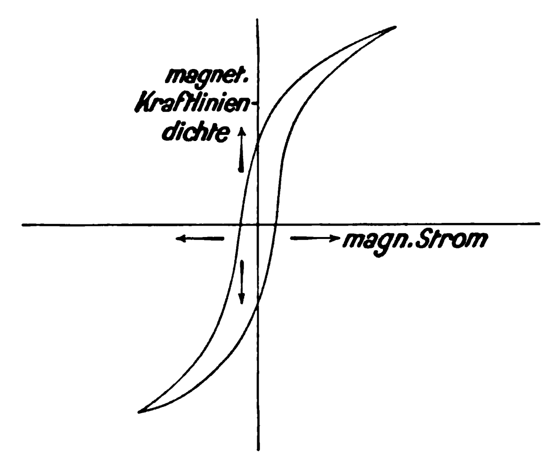


Abbildung 87. Hystereseschleife.

Da wir gesehen haben, daß alle normalen Maschinen bei annähernd konstanter Magnetisierung und konstanter Tourenzahl arbeiten, sind sämtliche Verluste in ihnen annähernd konstant mit Ausnahme der Stromwärmeverluste, die bei der Energieumsetzung mit dem Quadrat der Leistung zunehmen. Welchen Einfluß hat dieser Umstand auf den Wirkungsgrad? Der Wirkungsgrad ist doch stets das Verhältnis der nutzbaren zur aufgewandten Leistung, d. h. der Nutzleistung vermehrt um die Verluste; der Charakter der Wirkungsgradkurve muß infolgedessen bei sämtlichen normalen Maschinen derselbe sein. Gelingt es, die konstanten Verluste geringzuhalten, so muß er auch schon für geringe Energieumsetzung ein günstiger werden; die kleinsten Verluste, d. h. den größten Wirkungsgrad hat der Transformator, dessen konstante Verluste allein die im Eisen sind. Einen Vergleich der Wirkungsgrade normaler Maschinen bietet Abbildung 88, in der der listenmäßige Wirkungsgrad verschiedener Dynamos, Motoren und Transformatoren von normalen Spannungen oder Umdrehungszahlen und annähernd gleicher Leistung zusammengestellt ist, während die Wirkungsgradkurven verschieden großer Typen derselben Maschinengattung aus der Abbildung 89 hervorgehen.

Man ersieht aus der ersten Kurvenschar, daß der Wechselstrom-Kommutatormotor bedeutend hinter den anderen zurücksteht, und das ist ja auch nicht verwunderlich, da in ihm zu den Verlusten der Gleichstrommaschine noch die besonderen Verluste der Ummagnetisierung des ganzen Magnetgestelles und besondere Kommutationsverluste hinzukommen. Dabei besitzt ein Wechselstrom-Kommutatormotor ein größeres Gewicht als ein Nebenschluß- oder Dreh-

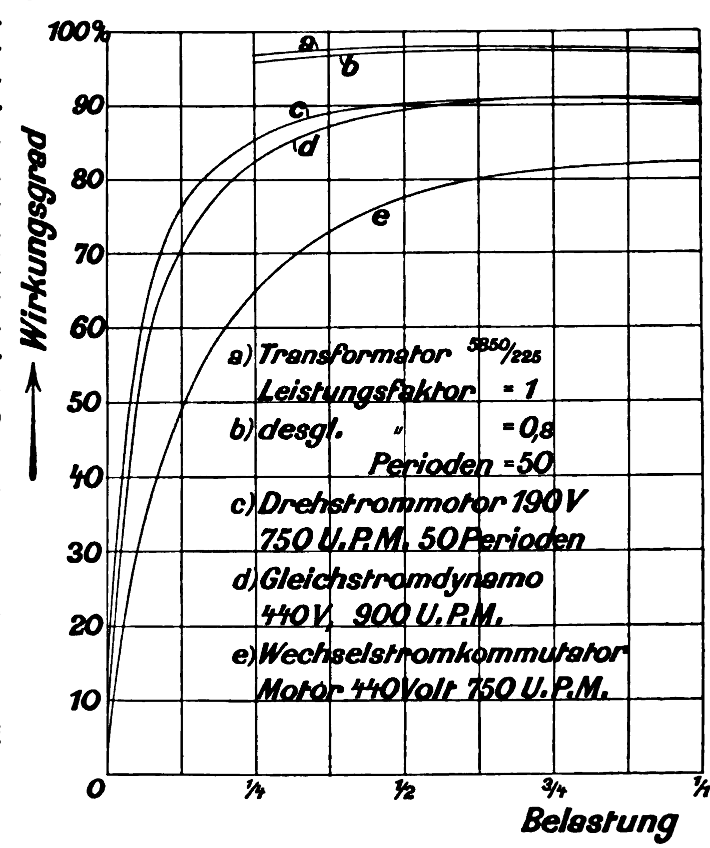


Abbildung 88. Wirkungsgradkurve verschiedener normaler Maschinen der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft, Berlin, die sämtlich ca. 40 Kilowatt Energie pro Sekunde umsetzen.

strommotor gleicher Leistung. Die elektrischen Maschinen zeichnen sich im übrigen schon seit einer Reihe von Jahren durch eine recht günstige Wirkungsgradkurve aus im Verhältnis zu anderen marktgängigen Antriebsmaschinen, so daß eine besondere Veranlassung, die Verluste noch mehr herabzudrücken, nicht vorlag. Das Bestreben richtete sich vielmehr auf eine Verbilligung, die besonders dadurch zu erreichen war, daß man das Material stärker beanspruchte und in einer kleineren Type mehr Energie als früher umsetzte.

Die Abführung der Wärme in den elektrischen Maschinen ist eine der an erster Stelle zu lösenden Aufgaben, will man die Dimensionen der Maschinen klein halten. Bei ähnlich gebauten Maschinen nur von verschiedenen Größenverhältnissen wachsen die Schwierigkeiten, wie wir schon bei den Transformatoren gesehen haben, mit den Dimensionen, da die Verluste im allgemeinen mit dem Volumen, d. h. mit der dritten Potenz der linearen Dimensionen, die die Wärme ausstrahlende Oberfläche nur mit dem Quadrat jener steigt. Vergleichen wir aber auch einmal ganz verschieden gebaute Maschinen, aber gleicher Leistung, miteinander, z. B. eine Dynamo für Dampfturbinenantrieb und eine, die mit einer langsamlaufenden Dampfmaschine direkt gekuppelt ist. Beide Maschinen haben bei der gleichen Leistung ungefähr den gleichen Wirkungsgrad, d. h. es wird annähernd auch dieselbe Anzahl Kilowatt in ihnen in Wärme umgesetzt. Wegen des raschen Laufes des Turbogenerators fallen aber seine Dimensionen um das Vielfache kleiner aus; die Umsetzung der Energie ist bei ihm eine konzentrierte. Wegen der geringeren ausstrahlenden Oberfläche macht nun die Abführung derselben Wärmemenge bedeutend größere Schwierigkeiten, günstig wirkt dagegen nur die große Umfangsgeschwindigkeit des Turbogenerators, da dadurch die Luft heftig an den rotierenden Teilen vorbei- und auch durch die feststehenden Teile hindurchgewirbelt werden kann. Zu jeder Fortleitung von Wärme gehört bekanntlich ein Temperaturgefälle, da doch Wärme nur von Punkten höherer zu solchen niederer Temperatur übergeht. Soll die Temperatur im Innern der Maschine also nicht hoch werden, so hat man die Strecken bis zu den Stellen, wo die Luft die Wärme abführen kann, möglichst klein zu machen. Das geschieht durch Unterteilung. Alle

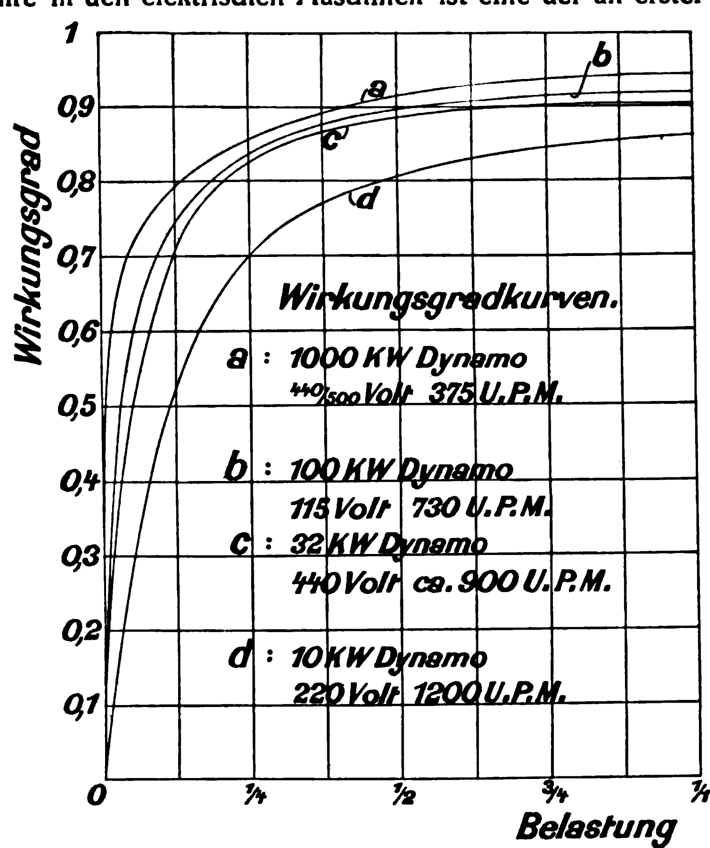
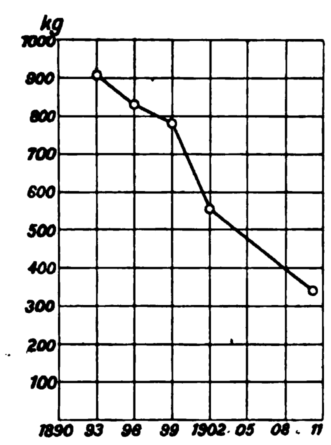


Abbildung 89. Wirkungsgradkurven verschiedener Gleichstromdynamos der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft, Berlin.

Blechpakete von größeren Transformatoren, größeren Dynamoankern, die Spulenwicklungen der Transformatoren und ebenso diejenigen auf den Polen normaler Dynamos werden daher mit Luftzwischenräumen hergestellt, die z. B. bei allen Ankern radial von einem Luftraum um die Achse herum nach außen führen (man vgl. die Abbildung 59 u. 60). Das bringt den weiteren Vorteil mit sich, daß die Luft wie durch einen Ventilator hindurch nach außen geschleudert wird und gleichzeitig die dort befindlichen Wicklungen kühlt. Früher wurden diese Luftkanäle mehr erfahrungsgemäß ihrer Anzahl und Lage nach angeordnet. Bei den gewaltigen Umfangsgeschwindigkeiten der Turbogeneratoren stellte sich aber die Notwendigkeit heraus, auch diesen Verhältnissen die vollste Aufmerksamkeit zu schenken, sollten nicht die durch Luftreibung eintretenden Verluste zum Teil wieder die erhoffte Wirkung vernichten. In die heutigen Turbogeneratoren sind häufig zum Ansaugen der Luft in den Anker hinein besondere Ventilatoren eingebaut, und ebenso werden die weiteren Luftwege möglichst nach den Prinzipien durchkonstruiert, die sich bei der Herstellung von Ventilatoren als richtig erwiesen haben. Zu vermeiden ist z. B., daß die Luft, welche aus den Ankerkanälen austritt, auf scharfe Kanten im feststehenden Gehäuse auftrifft, da sonst die Maschine wie eine Sirene laut zu heulen beginnt. Auch Wasserkühlung wird schon bei Turbogeneratoren benutzt. Die guten Erfahrungen, die man mit einer durchkonstruierten künstlichen Ventilation der Anker bei Dampfturbinenantrieb erzielte, veranlaßt die Fabriken, dasselbe Prinzip heutigentags auch auf normale Maschinen anzuwenden. Die eingebauten Ventilatorflügel müssen dabei natürlich für die Bedienung vollständig ungefährlich sein; wenn z. B. bisweilen auf die Wicklungen selbst Ventilationsbleche aufgesetzt wurden, so ist das vom konstruktiven Standpunkt aus vollständig zu verwerfen. Die Verringerung des Gewichts eines Motors für dieselbe Leistung, welche man durch das bessere Material, die bessere elektrische Durchkonstruktion und die bessere Ventilation bei mindestens gleichem Wirkungsgrad im Laufe der Jahre erreicht hat, ersieht man aus Abbildung 90.



Abbild. 90. Gewichtsabnahme eines 10-P.S.-Gleichstrommotors von 1000 U.P.M. der früheren Lahmeyer-Werke nach Dettmar.

DAS BESONDERE IM ELEKTROMASCHINENBAU VERWENDETE MATERIAL UND ANFORDERUNGEN DARAN. Während an einen Teil des im Elektromaschinenbau verwendeten Materials rein mechanische Ansprüche gestellt werden, hat ein großer Teil außerdem noch spezielle Anforderungen zu erfüllen: das stromführende Material solche in bezug auf Leitfähigkeit; das Eisen in bezug auf Magnetisierbarkeit und Freiheit von Hysterese- und Wirbelstromverlusten; die Isolationsmaterialien müssen nicht nur mechanisch zweckentsprechend und von großer elektrischer Durchschlagsfestigkeit sein, sie müssen auch gegen Wärme und Feuchtigkeit widerstandsfähig sein; die Bürsten müssen einerseits die genügende Leitfähigkeit, zum Gebrauch bei der Kommutation auch anderseits den genügenden Widerstand besitzen, innigen Kontakt mit den Kommutatorlamellen oder Schleifringen ergeben und diese Teile in möglichst geringem Maße abnutzen.

Als Leitungsmaterial wird fast ausschließlich elektrolytisch gewonnenes Kupfer benutzt, das die höchste Leitfähigkeit besitzt, es wird als Draht für die Wicklungen und als Stab für große Stromstärken und für die Kupferlamellen des Kommutators

gezogen. Ein Draht von 1 m Länge besitzt bei 1 qmm Querschnitt einen Widerstand von 0,016 Ohm bei 15° C. Der Widerstand steigt proportional der Länge, umgekehrt mit dem Querschnitt, ferner bei einer Temperatursteigerung um 25° um ca. 10%, oder bei 50° um 20%. Die zulässige Erwärmung der Kupferdrähte richtet sich nach den Vorschriften des Verbandes deutscher Elektrotechniker nach der Art ihrer Isolation:

bei Baumwollisolation 50° C
bei Papier- und Glimmerisolation 60° C

über die Temperatur der umgebenden Luft, vorausgesetzt, daß diese 35° C nicht überschreitet. Ruhende Wicklungen dürfen sich um 10° mehr erwärmen. Die zulässige Übertemperatur des Eisens richtet sich nach der Isolation der darin eingebetteten Wicklungen.

Die Anforderungen an das Eisen sind je nachdem verschieden, ob allein die Magnetisierbarkeit in Frage kommt, also wenn es seine Polarität in den von Gleichstrom erregten Magnetsystemen stets beibehält, oder ob die Rücksicht auf die Hysterese- und Wirbelstromverluste hinzukommt. In letzterem Falle bewährt sich bekanntlich besonders gut geglühtes, sehr weiches, also kohlenstoffarmes Schmiede- oder Flußeisen. In ihm sind die Molekularmagnete, die wir in jedem Eisen hypothetisch annehmen, am beweglichsten und zeigen daher die geringste Hysterese. Die Beweglichkeit und damit die Hystereseverluste sind abhängig von der Temperatur, auf welche die Bleche erhitzt wurden, von der Art der Abkühlung, sie ist verschieden in der Walzrichtung und senkrecht dazu; sie verändert sich, d. h. verschlechtert sich bei langem Lagern, man spricht dann vom „Altern der Dynamobleche", und ebenso ändert sie sich durch weitere Bearbeitung. Die Hysterese- und Wirbelstromverluste werden meist zusammen gemessen und zur Charakteristik des Materials der Verlust in Watt pro kg bei 100 Wechseln des Stroms oder 50 Perioden und bei einer Magnetisierung angegeben, die durch die Zahl von 10000 magnetischen Kraftlinien pro qcm definiert wird. Blech von 0,5 mm Stärke mit einem Verlust mit mehr als 4 Watt pro kg bei diesen Bedingungen wird in Maschinen nicht verwandt. 3 bis 3,5 Watt sind Zahlen für gewöhnliche Bleche. Durch Beimengung von Silizium stellt man Blech von noch geringeren Verlusten dar, da das Silizium eine geringere elektrische Leitfähigkeit des Eisens und damit geringere Wirbelstromverluste bedingt. Leider macht die Legierung mit Silizium die Bleche teurer, auch härter und spröder, so daß die Bearbeitung sehr erschwert wird. Für Transformatorenbleche, bei denen Stanzen von Nuten und weitere Bearbeitung nicht in Frage kommt, haben sie sich allgemein eingebürgert. Für Ankerbleche werden dagegen höchstens sogenannte halblegierte Bleche verwandt, meist solche ohne jeden Zusatz. Gegen die Wirbelströme, die immer in derselben Richtung fließen möchten wie die im Kupfer induzierten Ströme, wird das Eisen ferner, wie schon oben erwähnt, unterteilt und voneinander isoliert. Die Stärke der Bleche beträgt 0,5 bis 0,3 mm. Die Isolation wird fast immer durch Seidenpapier bewirkt, Amerika bevorzugte früher Isolierung durch Lack. Diese Art der Isolierung eignet sich aber nicht so gut, weil der Lack bei zu hoher Erhitzung durch Überlastung ausfließen kann.

Die Isolationsmaterialien. Die Anzahl dieser im Elektromaschinenbau verwandten Materialien nimmt von Jahr zu Jahr zu. Monographien, wie die von Turner-Hobart, bringen nicht einmal sämtliche jetzt auf dem Markt befindliche Materialien. Speziell im Maschinenbau dient Baumwolle zur Umspinnung oder Umklöpplung der Kupferdrähte, Leinwandband zur Isolierung der aus diesen Drähten bestehenden Spulen; Papier, Preßspan, Glimmer zur Isolierung der Spulen gegeneinander, wenn

sie in derselben Nute liegen, oder gegen das Eisen des Ankerkörpers. Statt reinen Glimmers kommen hauptsächlich Rohre usw. in Betracht, die aus Papier und Glimmerplättchen zusammengesetzt sind, dieser Stoff wird Mikanit genannt. Vor allem spielen aber dann die Isolierlacke eine große Rolle, mit welchen die Spulen im luftleeren Raum imprägniert werden. Die Absicht dabei ist, die stromführenden Leiter nicht nur an einzelnen Stellen von Nachbarleitern durch isolierende Schichten zu trennen, sondern den ganzen Raum in der Nähe der Leiter mit Isolationsmaterial auszufüllen. Freilich ist auch die Luft ein Isolationsmaterial, aber kein so gutes wie Glimmer, Gummi oder guter Isolierlack. Würden daher Lufträume übrigbleiben, so würde dort eventuell Elektrizität aus den Leitern austreten in sogenannten stillen Entladungen, dabei würde sich das Isolationsmaterial in der Nähe erwärmen oder chemische Umsetzungen erfolgen können und mit der Zeit ein Durchschlag erfolgen. Ziel jeder Isolierung ist daher, ein möglichst gutes Isolationsmaterial möglichst ohne Zwischenräume und Poren an die gefährdeten Stellen zu bringen, also eventuell bei gleichzeitiger Evakuierung und unter Druck. Die Gefahr eines Austrittes der Elektrizität wächst naturgemäß mit der vorhandenen Spannung, aber auch je nach der Form der Leiter. Besonders gefährdet sind alle Spitzen und Kanten. Zwei Beispiele von Nutenisolationen sind in Abbildung 91 gegeben. Die Kommutatorlamellen werden mit reinem Glimmer voneinander isoliert. Die Spulen zur Magnetisierung der Pole bestehen aus Drähten mit Baumwollumspinnung und sind noch mit Baumwoll- oder Leinenband umwickelt.

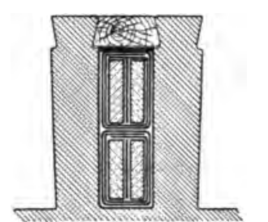
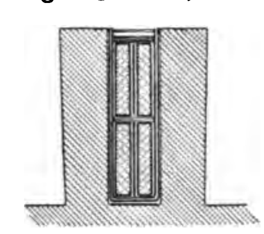



Abbildung 91. Nutenisolation.
Die Kupferstäbe können in die Nuten eingelegt werden und werden links durch Fiberkeile, rechts durch Drahtbandagen in den Nuten festgehalten.

Die Hoch- und Niederspannungswicklungen der Transformatoren sind meist durch Preßspan- oder Mikanitzylinder voneinander getrennt. Bei Öltransformatoren ist besonderes Gewicht auf die Güte dieses Isolationsmaterials zu legen. Es muß ein reines Mineralöl und verhältnismäßig dünnflüssig sein und darf keine Säuren oder Alkalien enthalten. Es darf sich ferner erst bei hohen Temperaturen entzünden, denn ein brennender oder explodierender Transformator hat schon ganze Zentralen in Flammen aufgehen lassen. Man setzt daher die Öltransformatoren auch häufig in Gruben; sollte sich dann der Transformator entzünden und der Behälter der hohen Temperatur nicht standhalten, so würde er doch nur in sich selber ausbrennen. Für die Isolation und Befestigung der Zuleitungen wird je nach der Höhe der Spannung Vulkanfieber, Hartgummi und Porzellan verwandt, daneben ebenso, wie für die Klemmbretter usw., eine Menge der verschiedensten Materialien, bei denen es hauptsächlich auf leichte Bearbeitung durch Drehen, Hobeln oder Bohren ankommt, Materialien, die eventuell gießbar oder in der Wärme preßbar oder biegbar sind, und die bei hoher Isolierungsfähigkeit sowohl gegen die Einflüsse des Lichts, der Wärme und von Säuren widerstandsfähig sein müssen und keine Feuchtigkeit annehmen dürfen. Dahin gehören: Ambroin, Stabilit, Adit und eine unzählige Menge anderer.

Maschinen und Transformatoren werden zur Prüfung ihres Isolationszustandes einer Durchschlagsprobe unterzogen, d. h. sie werden im warmem Zustande einer bedeutend höheren Spannung als der normalen mindestens eine Minute lang ausgesetzt. Die Normalien für Bewertung und Prüfung von elektrischen Maschinen, gültig im Jahre 1911, besagen darüber folgendes: „Maschinen und Transformatoren von 40 bis

5000 Volt sollen mit der 2½fachen Betriebsspannung, jedoch nicht mit weniger als 1000 Volt geprüft werden. Maschinen und Transformatoren von 5000 bis 7500 Volt sind mit 7500 Volt Überspannung zu prüfen. Von 7500 Volt an beträgt die Prüfspannung das 2fache. Ausgenommen hiervon sind Transformatoren für Prüfzwecke. Maschinen und Transformatoren unter 40 Volt sind mit wenigstens 100 Volt zu prüfen."

Wenden wir uns schließlich noch den Bürsten zu, so ist zu unterscheiden zwischen solchen, die nur durch Schleifringe Strom zu- oder abzuführen haben, oder an die besondere Anforderungen wegen der Kommutation zu stellen sind. Im ersteren Falle würden Bürsten aus Metallfedern oder Metallgewebe wegen der großen Leitfähigkeit die kleinsten Dimensionen erhalten. Sie würden sich aber selbst, wie die Schleifringe, stark abnutzen. Man benutzt auch hier deswegen vielfach Kohlebürsten, die eine bedeutend geringere Abnutzung der Schleifringe herbeiführen. Durch Zusatz von Metallpulver oder Einbringung dünner Metallfolie kann eine etwas bessere Leitfähigkeit mit einer guten „Schmierung" der Schleifringe durch die Kohle vereinigt werden. Um eine gute Kommutation zu erhalten, greift man dagegen zu reinen Kohlenbürsten, da, wie schon früher ausgeführt, der Widerstand günstig wirkt. Nur bei Maschinen für elektrolytische Zwecke, die immer sehr große Ströme bei geringer Spannung liefern müssen, verwendet man notgedrungen Metallbürsten, ebenso vielfach bei den Gleichstromgeneratoren, die direkt mit Dampfturbinen gekuppelt sind. Infolge der außerordentlich hohen Tourenzahl erzeugen auch hier Maschinen von verhältnismäßig kleinen Dimensionen sehr große Ströme.

DIE HERSTELLUNG DER ELEKTRISCHEN MASCHINEN UND EINIGE INTERESSANTE FABRIKATIONSMASCHINEN. Die ganze heutige Art der Fabrikation elektrischer Maschinen liegt darin begründet, daß, so weit wie möglich, alles in Massen fabriziert werden muß, soll eine Firma konkurrenzfähig bleiben. Das von den Walzwerken gelieferte Dynamoblech wird deshalb z. B. auf Beklebemaschinen mit Seidenpapier überzogen (vgl. Abbildung 92). Aus ihnen sind dann die Ankerbleche, die Polschuhe oder Transformatorbleche auszuschneiden. Bei allen kleineren Maschinen, die gleichzeitig in großer Zahl hergestellt werden, stanzt man die ganzen Bleche mit Nuten, Zähnen und den inneren Aussparungen mittels geeigneter Matrizen auf einmal aus. Werden nun ein paar Maschinen etwa von größeren Dimensionen gleichzeitig hergestellt, so verbietet der hohe Preis dieser Matrizen von vielen tausend Mark eine derartige Fabrikation. Man schneidet dann die Bleche mit einer sogenannten Kreisschere aus und stanzt Nute für Nute auf Maschinen nach Abbildung 93 aus, was natürlich einen viel größeren Zeitaufwand erfordert, oder wenn es sich, wie in allen Gleichstrommaschinen, um offene Nuten handelt (vgl. Abbildung 40), fräst man sie in die schon voll-

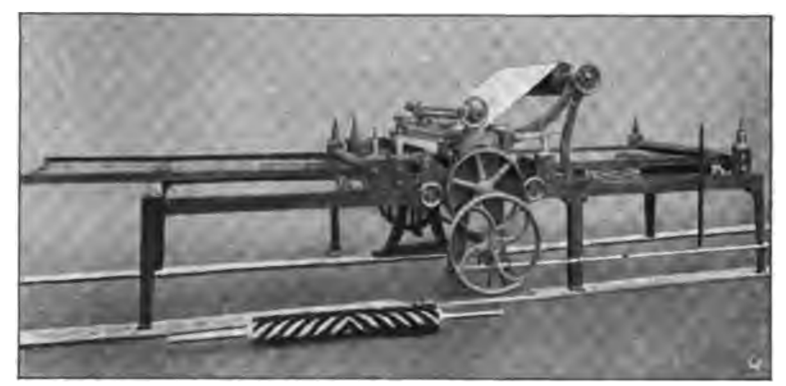


Abbildung 92. Blechbeklebemaschine.
Fabrikat der Maschinenfabrik Stolberg in Offenbach.



Abbildung 93. Nutenstanzmaschine der Firma Stolberg, Offenbach.

ständig zusammengepackten Ankerbleche ein. Alle Drahtspulen werden, wenn irgend möglich, so geformt, daß sie auf besonderen Maschinen gewickelt und dann in die Nuten des Ankers als „Trommelwicklungen" eingelegt werden können oder auf die Pole der Feldmagnete aufzuschieben sind. Aus elektrischen Gründen ist dies nur bei Induktionsmotoren ausgeschlossen, da bei ihnen die Nuten fast geschlossen sein müssen. Bei allen normalen Gleichstrommaschinen finden wir aber nur noch Formspulen, die von Hand in die Nuten eingelegt und deren Enden dann mit dem Kommutator verbunden werden. Infolgedessen ist der alte Grammesche Ring längst aus der Technik verschwunden, da man ihn nur von Hand wickeln kann (Abbildung 95). Dazu kommt freilich, daß die in seinem Innern befindlichen Kupferdrähte elektrisch gar nicht ausgenutzt wurden, da sie sich in einem von Kraftlinien freien Raume befanden. Vielleicht wäre sonst auch noch die maschinelle Bewicklung des Grammeschen Ringes gefunden worden. Denn eine ganz ähnliche Frage ist gelöst worden, als man die Spulen für die Anker mit Baumwollband maschinell statt von Hand bewickeln wollte. In Abbildung 96 sieht man eine Maschine, in der ein Ring durch einen Riemen von außen getrieben wird. Ein Teil des Ringes ist abnehmbar, so daß man eine Spulenseite in das Innere des Ringes hineinbringen und alsdann den Ring wieder schließen kann. Auf dem Ring ist eine Rolle mit dem Isolierband befestigt, wird er also durch den Riemen in Bewegung gesetzt, so kann die Spule mechanisch mit dem Isolierband bewickelt werden. Ein anderer Teil der Maschinen, an dem man die Gesichtspunkte der Massenfabrikation studieren kann, sind die Bürstenhalter. Bei ihnen werden jetzt meist kostspielige Gußstücke vermieden. Vielmehr wird versucht, sie aus Teilen zusammenzusetzen, die entweder aus Blech gestanzt oder gedrückt oder von profilierten gewalzten Stangen abgeschnitten sind. Auch die Kommutatorlamellen werden aus profiliertem gezogenem Kupfer abgeschnitten. Oder fassen wir die Befestigung der Ankerbleche auf der Welle ins Auge: wir finden, daß die Naben häufig durch Schrumpfringe gegen Ver-



Abbildung 94. Spulenwickelmaschine für einfache Zylinderspulen. Fabrikat der Firma Stolberg in Offenbach.

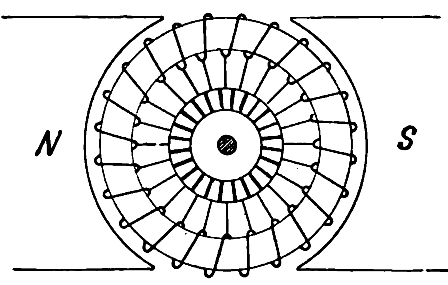


Abbildung 95. Schematische Darstellung des Grammeschen Ringes.

schiebungen auf der Welle gesichert sind, und daß die verschiedenen Ankerbleche bei kleineren Maschinen so zusammengehalten werden, daß sie erst hydraulisch zusammengepreßt und dann in einfacher Weise durch kleine Eisenstücke in der zusammengepreßten Lage festgehalten werden. Die Federkraft der Bleche genügt vollkommen, um diese Befestigung für alle Zeiten zu sichern. Überall werden wir so im Elektromaschinenbau das Bestreben finden, alle komplizierteren Arbeiten, wie Gewindeschneiden usw., zu vermeiden und Bearbeitung durch Stoßen und Hobeln durch die billigere Arbeit des Drehens und Fräsens zu ersetzen. In noch höherem Maße müssen diese Gesichtspunkte selbstverständlich im Kleinmotorenbau, z. B. der Ventilatoren, oder im Instrumentenbau, z. B. der Zähler, beobachtet werden.

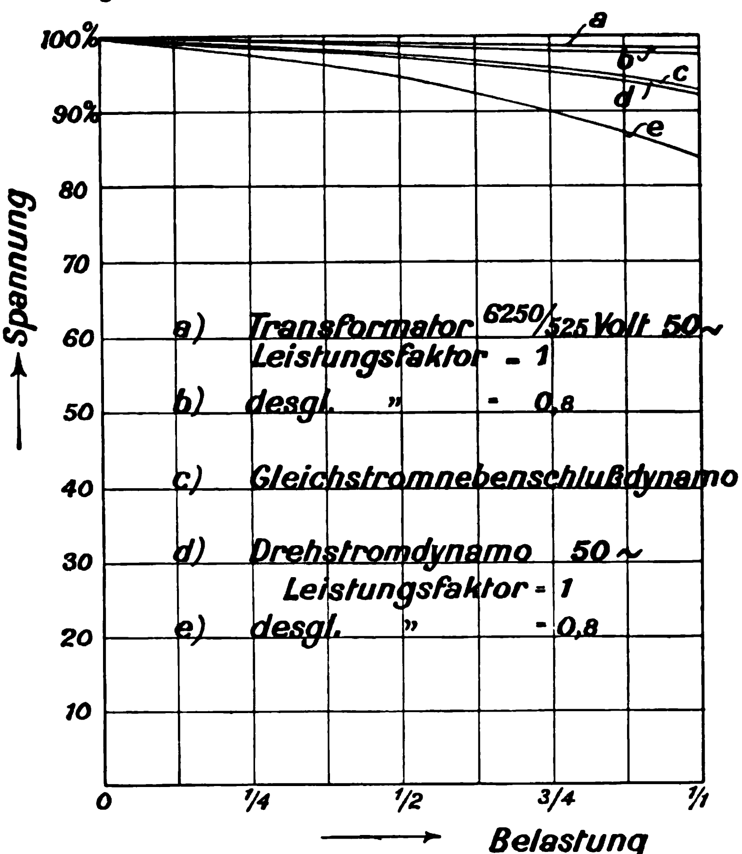


Abbildung 96. Maschine um geschlossene Spulen mit Band zu umwickeln. Fabrikat von Stolberg, Offenbach.

CHARAKTERISTIKEN NORMALER MASCHINEN. Unter den Normalmaschinen haben wir je nach der Stromart (Gleich-, Wechsel- oder Drehstrom) schon die verschiedensten Maschinen kennen gelernt. Immer interessierte uns speziell entweder das Verhalten der Spannung bei zunehmender Belastung, und zwar bei den Generatoren und Transformatoren, oder bei den Motoren das Verhalten der Tourenzahl. Trägt man die Spannung als Ordinate, die Belastung als Abszisse auf, so spricht man von der Spannungscharakteristik bei den erstgenannten Maschinen. Die Tourenzahl, aufgetragen als Funktion der Belastung, ergibt die Tourencharakteristik der Motoren. Spannungscharakteristiken verschiedener, aber gleich großer Generatoren und Transformatoren ersieht man aus Abbildung 97. Daraus ist zu ersehen, daß bei geringem Leistungsfaktor die Wechselstromgenerotoren einen größeren Spannungsabfall besitzen. Ähnlich sind in Abbildung 98 die Tourencharakteristiken verschiedener Motoren zusammengestellt.

BESONDERE MOTOREN. Die Elektrotechnik hat es aber nicht nur verstanden, diese normalen Aufgaben zu lösen, sondern es sind auch eine außerordentlich große Anzahl von besonderen Maschinen schon entwickelt worden, von denen ein Teil elektrische, ein Teil besonders mechanische Schwierigkeiten bereitete. Soll die Drehrichtung der Motoren z. B. beliebig umgekehrt werden, oder soll die Tourenzahl der Motoren bald hoch, bald niedrig sein, oder ist überhaupt mit sehr hohen Tourenzahlen zu rechnen, wie bei Antrieb von Zentrifugalpumpen, dann ist bei Verwendung von Gleichstrommaschinen die Kommutierung bedeutend erschwert. Bei Umkehrung der Drehrichtung z. B. müßten wir ja auch die Bürsten auf dem Kommutator um ein Stück verschieben, da, wie schon früher erwähnt, die Bürsten bei normalen Motoren immer etwas gegen die Drehrichtung zu verschieben sind. Ebenso wurde schon auf Seite 278 gesagt, daß die Schwierigkeit, welche die Kommutation der magnetischen Energie in der kurzgeschlossenen Spule stets bereitet, mit der Geschwindigkeit noch zunehmen muß. In allen diesen Fällen gelangt man zu einer Lösung, wenn man besondere Pole, Wendepole, zwischen den normalen Polen anbringt. Ihr Magnet-

feld läßt man dadurch genau proportional mit dem Ankerstrom wachsen, daß dieser selbst durch die Spulen der Wendepole fließt. Ist der Anker stromlos, so ist auch keine magnetische Energie der Ankerleiter zu kommutieren, dem entspricht der Umstand, daß auch die Wendepole dann nicht magnetisiert werden, also auch keine elektrischen Spannungen induzieren könnten. Je stärker die magetische Energie der Ankerleiter dagegen wird, um so kräftiger wird auch durch den Ankerstrom das magnetische Feld der Wendepole erregt, und damit nimmt nach unseren früheren Betrachtungen (vgl. S. 269) die Möglichkeit zu, der kurzgeschlossenen Windung Energie zu entnehmen oder ihr solche neu zuzuführen. Bei richtiger Wahl der Windungszahl der Wendepole kann die ideale Kommutierung, d. h. Ersatz der magnetischen Energie der Ankerleiter, durch einen reversibeln Prozeß für jede Belastung und Tourenzahl herbeigeführt werden. An Apparaten sind für Motoren für verschiedene Drehrichtung noch sogenannte Umkehranlasser erforderlich, da wieder durch vorgeschaltete Widerstände dafür gesorgt werden muß, daß die Ströme im Anker nicht zu groß werden.



Abbild. 97. Spannungscharakteristiken verschiedener normaler Dynamos und Transformatoren von ca. 250 KW Leistung, gebaut von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft, Berlin, etwa 1910.

Das Anlassen mit vorgeschaltetem Widerstand ist bei manchen Anlagen kostspielig und unhandlich. Recht hohe Anforderungen werden z. B. an die Motoren schon in der Papierfabrikation gestellt, sie müssen mit starkem Drehmoment anlaufen und je nach der Stärke des Papiers verschieden rasch laufen, außerdem haben sie zur Vorbereitung der Fabrikation einige Zeitlang immer bei ganz niedrigen Tourenzahlen zu arbeiten. Man kommt mit Vorschalten von Widerständen hier im allgemeinen nicht zum Ziel, vielmehr ist es erwünschter, dem Anker des Motors bald eine hohe Spannung für hohe Tourenzahlen, bald eine geringe für die niedrigen Tourenzahlen zuzuführen. Das ist nur möglich, wenn man einen besonderen Umformer anwendet und in der Dynamo des Aggregats die gewünschte Spannung erzeugt. Oder man kann auch zum Anlassen in einer Zusatzdynamo eine derartige Spannung erzeugen, daß sie die Spannung des Netzes fast aufhebt und nur eine geringe Spannung an dem Anker des Motors oder

der Motoren übrigbleibt. Die Herstellung der richtigen Spannung ist durch einen kleinen Regulierwiderstand im Felde der Zusatzdynamo leicht erreichbar. Natürlich wird man auch die Dynamo praktisch mit Wendepolen versehen. Die Schaltung wird nach ihrem Erfinder „Leonard-Schaltung" genannt und wird nicht nur für den genannten Zweck, sondern auch z.B. zum Drehen der Geschütztürme auf Kriegsschiffen, zum Betriebe von Umkehrwalzenstraßen und bei Förderanlagen benutzt. Die letztgenannten Betriebe stellen überhaupt an den elektrischen Antrieb die höchsten Anforderungen, so daß es erst im letzten Jahrzehnt gelungen ist, allmählich die Elektrizität im Bergwerks- und Hüttenbetriebe, und zwar zunächst für die Wasserhaltungen, dann für die Förderanlagen, schließlich auch zum Antrieb der Walzenstraßen einzuführen. Bei Förderanlagen und Walzenstraßen ist es allein mit der Verwendung von Wendepolmotoren und der Leonard-Schaltung nicht getan. Der Kraftverbrauch einer Förderanlage ändert sich z. B. entsprechend dem Anfahren, der normalen Fahrt und den notwendigen Pausen für Auf- und Abladen dauernd innerhalb weniger Minuten, bei Motoren für Umkehrwalzenstraßen sogar innerhalb weniger Sekunden. Würde man diese schwankende Energie einem gewöhnlichen Verteilungsnetz entnehmen wollen, so würden an allen übrigen Abnahmestellen unerträgliche Schwankungen der elektrischen Spannung eintreten. Steht Gleichstrom zur Verfügung, so könnte man sich dadurch helfen, daß man gewaltige Akkumulatorenbatterien aufstellte und ihnen die notwendigen Energiemengen entnähme. Meist ist aber in den Bergwerksbezirken wegen der besseren Verteilbarkeit der elektrischen Energie Drehstrom vorhanden, der ja nicht aufspeicherungsfähig ist. Es ist daher ein anderes Reservoir an Energie herzustellen, das kurze Zeit die benötigten Energiemengen hergeben kann, während in den Ruhepausen die Energie von neuem wieder angesammelt wird. Dieses Problem löste Ilgner, indem er wie Leonard als Antriebsmotoren Gleichstrommotoren verwandte, die notwendige

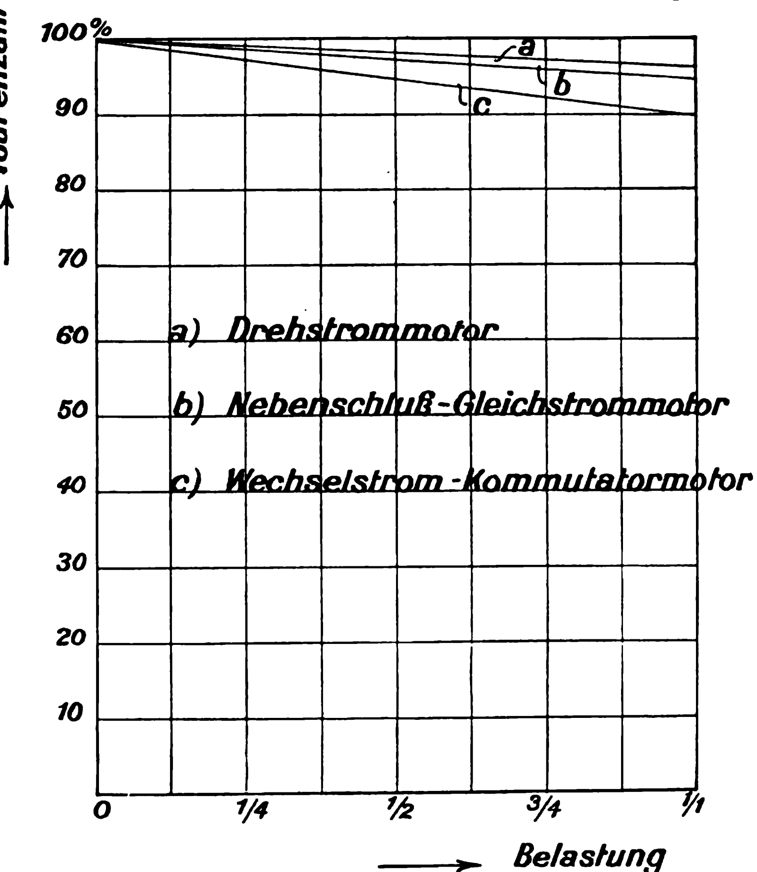


Abbildung 98. Tourencharakteristiken verschiedener normaler Motoren von ca. 40 P.S. Leistung, gebaut von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft, Berlin, im Jahre 1911.



Abbildung 99. Auseinandergenommener Wendepolmotor von 80 P.S., 500 Volt und 915 Umdrehungen pro Minute mit 4 breiten Polen mit Nebenschlußwicklung und 4 schmalen Wendepolen. Fabrikat der Siemens-Schuckert-Werke, Berlin.

Energie in einem Umformeraggregat, bestehend aus Drehstrommotor, Gleichstromdynamo mit besonderer Erregerdynamo, umformte und nun dieses Aggregat mit einem oder mehreren gewaltigen Schwungrädern versah. Ein solches Aggregat für die österreichische Hildegardenhütte besitzt z. B. zwei Schwungräder von einem Gewicht von je 26 Tonnen bei 375 U. p. M. Soll die in diesem Schwungrad aufgespeicherte Energie der Bewegung wirklich hauptsächlich die notwendige Kraft zum Anfahren liefern, so darf der Motor, hier also ein Drehstrommotor, nicht gleichzeitig die Energie dem Netz entnehmen. Man müßte ihn also entweder so lange vollständig vom Netz abschalten oder versuchen, ihn künstlich langsamer laufen zu lassen, als eigentlich der gegebenen Spannung entspricht. Dann wird bei der noch vorhandenen größeren Geschwindigkeit des Schwungrades dieses tatsächlich Energie an den Arbeitsmotor abgeben können, mag dieser nun die Förderanlage oder eine Walzenstraße betreiben. Diesen letzteren Weg wählte Ilgner, und zwar durch einen Apparat, durch den künstlich Widerstand in den Rotor des Motors ein- und ausgeschaltet werden kann. Mit eingeschaltetem Widerstand vergrößert sich die Schlüpfung, d. h. die Tourenzahl wird geringer. Durch den Apparat, „Schlupfregeler" genannt, wird also beim Anfahren Widerstand automatisch eingeschaltet, beim Stillstand der Förderanlage ausgeschaltet.



Abbildung 100a. Magnetgestell einer größeren Gleichstrommaschine mit Wendepolen der Maffei-Schwartzkopff-Werke, Berlin.



Abbildung 100b. Genau dieselbe Maschine wie 100a, zusammengebaut.

Durch Schwungrad und Schlupfregeler erreichte es Ilgner, daß an den Meßinstrumenten des Umformeraggregats eine fast konstante Energieaufnahme aus dem Netz nachzuweisen ist, wie gewaltig auch die Schwankungen der Energieaufnahme der Arbeitsmotoren sein mag.

Auch auf andere Weise hat man schon, speziell wenn Drehstrom zur Verfügung stand, das Problem zu lösen versucht, bald mit dieser, bald mit jener Tourenzahl zu arbeiten. Denn die

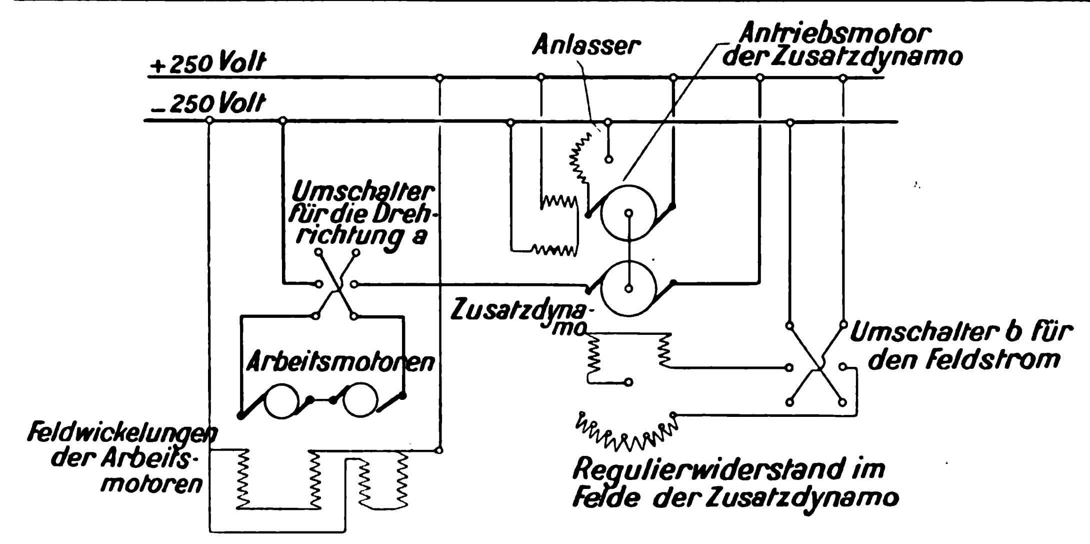


Abbildung 101. Leonard-Schaltung.
Die beiden Arbeitsmotoren, Gleichstrom-Nebenschlußmotoren, erhalten beim Anlauf nur die Differenz der Netzspannung und derjenigen der Zusatzdynamo. Diese wird verringert, bis die Motoren schließlich die ganze Netzspannung erhalten. Dann kann der Umschalter b der Feldwicklung umgelegt werden, die Zusatzdynamo erzeugt dann eine dem Netz gleichgerichtete Spannung. Beträgt die Netzspannung z. B. 500 Volt, so können die Arbeitsmotoren bei voll erregter Zusatzdynamo sogar mit 1000 Volt betrieben werden und daher eine doppelt so hohe Tourenzahl erreichen wie bei der Netzspannung allein. Ihre Drehrichtung kann durch Umschaltung ihres Ankerstroms mittels des Hebelschalters a umgekehrt werden.

Lösung Ilgners mit den gewaltigen Umformern kommt nur für Leistungen von mehreren hundert oder tausend P.S. in Betracht. Eine Möglichkeit ist von der Firma Oerlikon in der Schweiz für einfache Drehstrommotoren ausgeführt worden. Da die Umdrehungszahl, wie wir gesehen haben, bei gegebener Periodenzahl direkt von der Polpaarzahl abhängig ist, schaltet sie die Drähte im Stator so um, daß bald die eine, bald die andere Anzahl von Polen erzielt wird. Das geht ja, weil keine ausgeprägten Pole im Eisen, wie in den Gleichstrommotoren, vorhanden sind. Doch arbeiten diese Motoren nicht gerade sehr günstig. Eine andere interessante Schaltung entsteht durch Hintereinanderschaltung zweier normaler Drehstrommotoren von verschiedener Polzahl, von denen der eine unbedingt Schleifringe besitzen muß. Alsdann können die Ströme aus diesem Rotor dem Stator des zweiten Motors zugeführt werden, man spricht dann von „Kaskadenschaltung". Da auch jeder Motor einzeln an die Netzspannungen gelegt werden kann und dann mit einer bestimmten anderen Tourenzahl läuft, und schließlich noch eine vierte Tourenzahl durch Gegenschaltung der beiden Motoren erreicht werden kann, sind solche Motoren in Kaskadenschaltung schon zum Antrieb von Papiermaschinen oder in Draht-Walzwerken



Abbildung 102. Ilgner-Umformer für eine Förderanlage der Zeche Gottfried Wilhelm, Rellinghausen, geliefert von den Siemens-Schuckert-Werken, Berlin. Rechts das Schwungrad.



Abbildung 103. Kaskadenumformer in Reudnitz, geliefert von den Siemens-Schuckert-Werken. Leistung 880—1000 KW. Dem Stator des Asynchronmotors (rechts) wird direkt hochgespannter Drehstrom von 9500 Volt bei 50 Perioden zugeführt, Umdrehungszahl 250. Von dem nicht sichtbaren Rotor wird Drehstrom niederer Periodenzahl dem Umformeranker links zugeführt, den Bürsten (sichtbar) ist Gleichstrom bis 2000 Ampere bei 440—500 Volt zu entnehmen.

benutzt worden, wenn nur Drehstrom zur Verfügung stand.

Durch die Kombination zweier Maschinen kann auch der Umformer verbessert werden im sogenannten Kaskadenumformer von Bragstad-La Cour: ein Normal-Drehstrommotor mit Schleifringrotor ist auf derselben Welle mit einem Einankerumformer montiert. Der Drehstrom kann entweder nur dem Motor zugeführt werden, oder es kann der Drehstrom, der im Rotor induziert wird, weiter an den Umformer. In der zweiten Schaltung kann auch hier Gleichstrom vom Kommutator des Einankerumformers abgenommen werden, zum Anlauf wird allein der Drehstrommotor in normaler Weise benutzt. Hierdurch besitzt der Kaskadenumformer gegenüber dem Einankerumformer den Vorteil, daß man ihn auch von der Drehstromseite aus ohne Schwierigkeiten in Betrieb setzen kann. Auch sein Wirkungsgrad ist günstig. Der Drehstrommotor kann ferner für beliebige Spannungen gewickelt werden, so daß eine Transformierung, die bei einem einfachen Umformer notwendig wäre, vermieden werden kann.

Da man der Frage, wie man die Tourenzahl des Drehstrommotors verändern kann, in der letzten Zeit erhöhte Aufmerksamkeit widmet — ist dies doch der einzige Punkt, in dem er dem Gleichstrommotor unterlegen zu sein scheint —, so darf eine Lösung nicht unerwähnt bleiben, die schon im Jahre 1891 von Görges angegeben wurde, aber erst in allerletzter Zeit wieder das erhöhte Interesse der Praxis gefunden hat. Dieser Drehstrommotor für variable Tourenzahl ist mit Kommutator ausgerüstet, d. h. er besitzt ein Gestell ähnlich einer Drehstromdynamo oder ähnlich dem Stator eines Asynchronmotors (vgl. Abbildung 59). In dieses Gehäuse wird wiederum ein einfacher Gleichstromanker hineingesteckt, auf dessen Kommutator Bürsten aufruhen, die um zwei Drittel der Polteilung voneinander entfernt sind. Wie rasch nun auch der Anker laufen möge, immer kann an derselben Stelle im Raum durch diese drei Bürsten dem Anker Drehstrom zugeführt werden. Dies geschieht z. B., indem man die drei Bürsten über einen Autotransformator für Drehstrom ebenfalls an die Netzspannung anlegt (vgl. Abbild. 104).

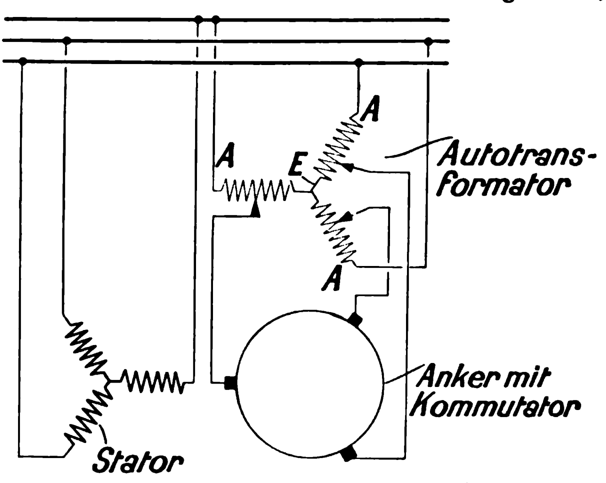


Abbildung 104. Schaltungsschema des Drehstrom-Kommutator-Motors für variable Tourenzahl nach Görges.

Auch ein solcher Motor entwickelt ein Drehmoment geradeso gut wie der einfache Kommutatormotor, vorausgesetzt, daß man den Strom an richtigen Stellen dem Kommutator zuführt, weshalb die Bürsten verschiebbar angeordnet sind. Ja, bei geeigneter Einstellung ist es sogar möglich, die Energie in diesem Motor bei einem Leistungsfaktor gleich 1 umzusetzen. Die schon recht komplizierten elektrischen Vorgänge können natürlich hier nicht näher erklärt werden. Eine veränderliche Tourenzahl erhält man dadurch, daß man an die Bürsten eine höhere oder niedrigere Spannung legt, indem man die Abnahmestellen am Transformator verändert. Jede beliebige Spannung ist bei dieser Anordnung erreichbar, von der vollen Netzspannung, wenn die Kontakte bei A stehen, bis zur Spannung 0, wenn alle drei im Punkte E vereinigt sind. Der Ausbildung dieses Motors stand bei seiner Erfindung zunächst im Wege, daß man noch mit dem Asynchron-Drehstrommotor zu stark beschäftigt war und auch die Kommutierungsvorgänge bei Wechselstrom nicht so genau studiert hatte, daß man auf einen stets funkenfreien Lauf mit Sicherheit rechnen konnte. Die Entwicklung des Einphasenmotors für Bahnbetrieb hat erst auf die Ausbildung des Drehstrom-Kommutatormotors von Görges befruchtend und anregend gewirkt.

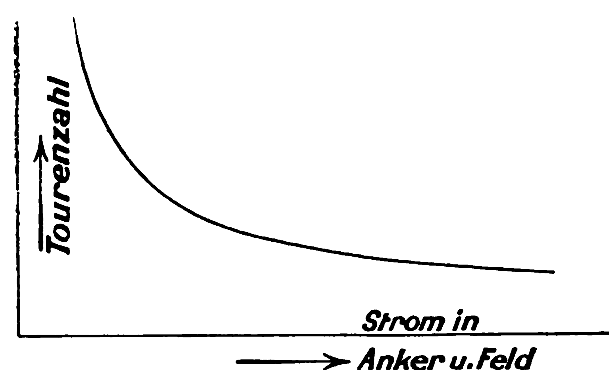


Abbildung 105. Geöffneter Gleichstrom-Bahnmotor von ca. 50 P.S. der Bergmann El. Werke, Berlin.

Die Bahnmotoren. Bei weitem die verbreitetsten anomalen Motoren sind die Bahnmotoren. Die Forderungen an sie sind:

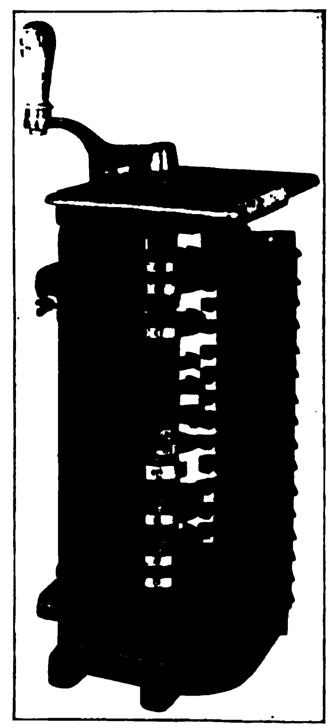
1. Ein hohes Anlaufsmoment.
2. Einstellen beliebiger Tourenzahlen bei gegebener Spannung.
3. Umkehr der Drehrichtung.
4. Die Möglichkeit, sie und die angetriebenen Wagen möglichst rasch abbremsen zu können.

Daneben ist ihr Betrieb ein vollständig anderer als derjenige normaler Motoren, da sie gerade so wie die Motoren der Förderanlagen und der Reversier-Walzwerke fortdauernd aus- und eingeschaltet werden müssen. Die Technik unterscheidet den normalen Dauerbetrieb, kurzzeitigen und intermittierenden Betrieb. Der Bahnbetrieb gehört zu den letzteren. Dazu kommt ein meist sehr beschränkter Raum für die Unterbringung der Motoren und die Notwendigkeit, sie vor Staub und Nässe vollständig zu schützen. Für alle Straßenbahnen und auch einen Teil der Interurbahnlinien wählte man Gleichstrom, einmal, weil dann Energie in Akkumulatoren aufzuspeichern war, dann aber, weil man zunächst für Gleichstrom passende Motoren entwickelte. Diese Bahnmotoren werden als Hauptstrommotoren gebaut, indem derselbe Strom erst die Spulen des Magnetfeldes, dann den Anker durchfließt, nach Abbildung 68. Das Magnetfeld wächst daher mit dem Ankerstrom an, und das Drehmoment, das diese Motoren bei größeren Strömen als den normalen entwickeln können, nimmt aus doppeltem Grunde zu, während es in einem Nebenschlußmotor mit konstantem Magnetfeld einfach proportional mit dem Ankerstrom wächst. Läßt man z. B. den $1^1/_2$ fachen normalen Strom für den Anzug des Motors zu, so entwickelt der Nebenschlußmotor auch nur das $1^1/_2$ fache Drehmoment, der Hauptstrommotor dagegen etwas mehr als das Doppelte. Die Tourencharakteristik eines Hauptstrommotors ist in Abbildung 106 dar-



Abbild. 106. Tourencharakteristik eines Hauptstrommotors.

gestellt, d. h. sie wächst mit sinkender Belastung oder sinkendem Strom gewaltig. Das ist aus dem Vergleich mit dem abgebremsten Rad leicht verständlich. Das mit dem Ankerstrom abnehmende magnetische Feld im Magnetgestell entspricht einer Bremskraft, die bei Verringerung der umgesetzten Energie dauernd vermindert wird. Würde man bei einem abwärtsfahrenden Wagen die Motoren also dauernd eingeschaltet lassen, so könnten eventuell gefährliche Geschwindigkeiten erreicht werden. Da aber stets ein Mann zu ihrer Bedienung vorhanden ist, wird diese Gefahr gern in Kauf genommen. Die verschiedenen Geschwindigkeiten, die im Bahnbetrieb erwünscht sind, werden ferner meist dadurch erreicht, daß man mindestens zwei Motoren verwendet, die für geringere Geschwindigkeiten hintereinandergeschaltet werden, so daß jeder nur die Hälfte der Spannung erhält, während sie für hohe Tourenzahlen parallel an die volle Spannung gelegt werden. Der Vorteil beim Anzug ist dann noch der, daß zur Erreichung eines passenden Anlaufstromes verhältnismäßig wenig Widerstand vor die beiden Motoren in Hintereinanderschaltung eingeführt zu werden braucht. Elektrisch ist die Konstruktion dieser Motoren noch dadurch etwas schwieriger, daß man im Bahnbetriebe 500 bis 700 Volt Spannung verwendet, während die Glüh- und Bogenlampen in normalen Verteilungsnetzen Spannungen von höchstens 220 oder 440 Volt bei sogenannten Dreileiternetzen erheischen. Die Neigung zu Funken am Kommutator nimmt aber mit der höheren Spannung zu. Auch hier hat man die Schwierigkeiten, selbst für noch höhere Spannung, durch Verwendung von Wendepolen überwunden. Die Motoren der Rheinuferbahn zwischen Köln und Bonn sind z. B. schon für 1300 Volt konstruiert, während man versuchsweise auch schon Bahnmotoren bis ca. 3000 Volt Gleichstrom ausgebildet hat.



Abbild. 107. Bahnkontroller der Bergmann El. Werke, Berlin.

Die Bremsung der Motoren kann mit oder ohne Wendepol so erfolgen, daß sie vom Netze abgeschaltet und mit Widerständen verbunden werden, und zwar benutzt man gleich die Anlaßwiderstände zu diesem Zweck. Da die Umsetzung elektrischer Energie in mechanische auch in den Hauptstrommotoren reversibler Natur ist, wirken alsdann die Maschinen als Dynamos und geben die mechanische Energie der Bewegung, die sowohl in ihnen selbst wie im Wagen steckt als elektrische Energie und schließlich als Wärme an die Widerstände ab. Die Schaltungen, die dadurch notwendig werden, werden durch den sogenannten Kontroller bewirkt.

Für sehr große Entfernungen würde der Verlust bei den immerhin niedrigen Spannungen der Gleichstrom-

Bahnbetriebe zu groß ausfallen, oder umgekehrt würde bei annehmbaren Verlusten zu viel Kapital in die Zuführungsleitungen gesteckt werden müssen. In diesen Fällen kann nur Wechselstrom benutzt werden, und zwar scheint nach dem Früheren zunächst der Drehstrommotor wegen der Einfachheit seiner Konstruktion usw. in Frage zu kommen. Er besitzt aber weder ein hohes Anlaufsmoment noch eine leicht regulierbare Tourenzahl, da er ja, wie wir gesehen haben, die Tourencharakteristik des Nebenschlußmotors, aber nicht seine Regulierbarkeit besitzt. Vor allen Dingen hat er aber den Nachteil, daß ihm durch drei Leitungen die Energie zugeführt werden muß, während es bei Gleichstrom und einphasigem Wechselstrom ihrer nur zwei zu sein brauchen, von denen die eine noch dazu durch die Schienen gebildet werden kann. Bei Drehstrom dagegen sind mindestens zwei, besser sogar drei Zuführungsleitungen erforderlich. Solange es sich um einfache Bahnen handelt, wie z. B. die Bergbahnen in der Schweiz, bei denen der Verkehr nur zwischen zwei Endstationen und einer Anzahl Zwischenstationen ohne Abzweiglinien aufrechterhalten zu werden braucht, ist auch der Drehstrommotor mit verhältnismäßig geringen Abänderungen gegenüber den normalen mit Erfolg angewandt worden. Auch die Schnellbahnversuche Berlin-Zossen wurden bekanntlich mit Drehstrommotoren ausgeführt, und es gelang hier ohne Schwierigkeiten, Ströme bei 10000 Volt Spannung den drei Kupferleitungen, die neben dem Fahrdamm an Gestängen aufgehängt waren, bis zu Geschwindigkeiten von 200 km pro Stunde zu entnehmen. Sobald es sich aber um einen regulären Bahnbetrieb mit Abzweigstrecken, den verschiedensten Gleisen und Weichen in den Zwischenbahnhöfen handelt, führen die drei notwendigen Leitungen, die nun ebenfalls ihre Weichen und Kreuzungen erhalten müßten, konstruktiv auf unüberwindliche Schwierigkeiten. Aus diesem Grunde mußte das Bestreben dahin gehen, einen Einphasen-Wechselstrommotor möglichst mit den Eigenschaften des Hauptstrommotors auszubilden. Dieses Problem ist es, das die Wechselstrom-Kommutatormotoren auf den Kampfplatz der elektrischen Maschinen gerufen hat. Ohne dieses wichtige Problem würde auch der früher erwähnte Kommutatormotor für konstante Tourenzahl wohl niemals das Licht der Welt erblickt haben. Bei Haupt-



Abbild. 108. Anker eines Wechselstrom-Kommutatormotors der Maffei-Schwartzkopff-Werke, Berlin, im Bau begriffen.



Abbildung 109. Stator und Anker (vgl. Abbild. 108) eines Wechselstrom-Kommutatormotors für eine Grubenbahn. Fabrikat der Maffei-Schwartzkopff-Werke, Berlin.

stromschaltung scheint sich zunächst jeder entsprechende Gleichstrom-Bahnmotor auch für Wechselstrom zu eignen, denn wir sahen schon früher, daß die erste Schwierigkeit bei der Erzeugung eines starken Drehmoments, nämlich die Phasengleichheit des magnetischen Wechselfeldes und des den Anker durchfließenden Wechselstroms, ohne weiteres bei Hauptstromschaltung überwunden wird. Nur müßte man natürlich auch das ganze Magnetgestell lamellieren, da in ihm ja ebenfalls nun magnetische Wechselfelder vorhanden sind. Tatsächlich würde ein solcher Motor — nur mit starken Funken — mit Wechselstrom arbeiten und die elektrischen Eigenschaften des Hauptstrommotors für Gleichstrom im großen und ganzen ergeben. Daß das Drehmoment gegenüber dem Gleichstrommotor 100 mal pro Sekunde seine Stärke ändert, würde praktisch keine Bedeutung haben, aber ein fundamentaler Unterschied ist doch vorhanden. Dadurch, daß wir es mit Wechselfeldern zu tun haben, würde eine starke Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung auftreten können, besonders bei Anlauf, wenn noch keine Energie in mechanische umgesetzt wird. Auch bei Lauf krankten viele Kommutatormotoren an einem kleinen Leistungsfaktor; diesen recht groß, möglichst gleich 1 zu machen, ist daher ein weiteres Bestreben der Konstrukteure. Bei Anlauf scheint der Einfluß des Magnetfeldes freilich in einer Beziehung günstig. Wir haben gesehen, daß infolge der umgesetzten magnetischen Energie oder auch, wie man sagt, infolge des Einflusses der Selbstinduktion die Spannung bei Wechselstrom höher sein muß, als allein dem Spannungsabfall im Widerstande entspricht. Bei Gleichstrom war ja die Spannung immer gleich Strom $\times$ Widerstand. Damit der Strom beim Anfahren nicht zu groß wurde, mußten bei ihm aber besondere Widerstände vorgeschaltet werden; da bei Wechselstrom die Stromstärke schon durch die „Selbstinduktion" herabgedrückt wird, kommt man also dort mit weniger Widerstand aus. Nichtsdestoweniger überwiegt der Nachteil eines geringen Leistungsfaktors bei Anlauf, und man sucht die Magnetfelder, die nicht unbedingt zur Entwicklung eines Drehmoments notwendig sind, zu unterdrücken. Ein Magnetfeld muß natürlich bestehen bleiben, es wird aber in einem Wechselstrom-Kommutatormotor kleiner gewählt als in einem entsprechenden Gleichstrommotor. Für ein gleiches Drehmoment müssen dann die wirksamen „Arbeitsströme" entsprechend vergrößert werden. Deren magnetisches Feld und seine Energie ist aber zu unterdrücken. Zu diesem Zwecke kompensiert man also, wie auch schon früher dargelegt wurde, das Feld dieser Arbeitsströme. Zur Erzielung einer guten Kommutation wendet man ferner oft eine besondere Verteilung der Wicklung an und besondere konstruktive Hilfsmittel. Auch bei diesen Motoren spielt die Streuung eine bedeutende Rolle. Zu ihrer Herabsetzung und zur Verminderung der störenden magnetischen Energie in der Maschine werden auch alle diese Motoren mit kleinem Luftspalt und ohne ausgeprägte Pole gebaut, so daß die Wicklung des feststehenden Teils äußerlich dem Stator eines Asynchronmotors ähnlich sieht, während der Anker einem Gleichstromanker entspricht. Da wir das magnetische Feld sowohl vom Stator als auch vom Anker aus, wie wir früher gesehen haben, erzeugen können, da wir ferner die gewünschte Kompensation sowohl



Abbildung 110. Welchselstrom-Kommutatormotor für Grubenlokomotive (vgl. Abbildung 108 und 109), auf Radachse montiert. Maffei-Schwartzkopff-Werke, Berlin.

durch geschlossene Windungen wie durch besonders zugeleitete Ströme erreichen können, da wir schließlich noch die verschiedenen Wicklungen mannigfaltig miteinander kombinieren können, so ist die Anzahl der patentierten Wechselstrom-Kommutatormotoren für den Bahnbetrieb eine außerordentlich große, so daß hier nicht näher darauf eingegangen werden kann. Man hat verschiedene Vorschläge für ihre Einteilung gemacht, doch wird wohl die schon bisher übliche Bezeichnung nach den Erfindern weiter bestehen bleiben. Sehr vielfach eingeführt ist die Konstruktion von Winter-Eichberg durch die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft.

Abbild. 111. Ansicht eines Winter-Eichberg-Motors, Fabrikat der Allg. Elektrizitäts-Gesellschaft, Berlin.

Auch bei diesem Motor wird das magnetische Feld im Anker erzeugt. Der Vorzug des Motors liegt darin, daß er sogar mit einem Leistungsfaktor gleich 1 arbeiten und daß man die Tourenzahl in recht einfacher Weise mittelst eines Transformators regulieren kann. Doch würde auch hier die genauere Darstellung vollständig über den Rahmen dieses Buches hinausgehen.

BESONDERE GENERATOREN. Während wir eine außerordentlich große Anzahl verschiedener Motoren mit besonderen Eigenschaften kennen gelernt haben, ist die Zahl speziell elektrisch interessanter Generatoren von wirtschaftlicher Bedeutung verhältnismäßig gering. Schon die Umkehrung des Hauptstrommotors, die Hauptstromdynamo, wird im Vergleich zur Nebenschlußdynamo nur in verschwindend wenig Fällen angewandt, da ihre Spannungscharakteristik (Abbildung 112) selten zu gebrauchen ist. Zur Kraftübertragung von einer Stelle zu einer einzigen bestimmten anderen ist sie manchmal angewandt worden, indem man an der ersten eine Hauptstromdynamo, an der zweiten einen fast gleich großen Hauptstrommotor aufstellte. Treibt man dann die Dynamo mit konstanter Tourenzahl an, so läuft merkwürdigerweise auch der Motor bei jeder beliebigen Belastung ebenfalls mit konstanter Tourenzahl, obgleich er also die verschiedensten Ströme bei den verschiedensten Spannungen der Dynamo entnimmt. Da nur selten der Fall eintreten wird, daß man die erzeugte Energie an einem einzigen Punkte wieder verwenden will, die Spannung einer einzigen Gleichstrommaschine ferner, wie wir schon bei den Motoren gesehen haben, bis jetzt nicht gut über 2000—3000 Volt hinausgetrieben werden kann, ist diese einfache Hauptstrom-Kraftübertragung durch die Verteilung der Energie durch hochgespannte Drehströme vollständig verdrängt worden. Die geschilderten Eigenschaften der Hauptstromdynamo, speziell ihre Spannungscharakteristik, ist physikalisch leicht verständlich. Die induzierte elektromotorische Kraft einer Maschine war stets abhängig von der Geschwindigkeit, mit der der Anker gedreht wurde, und von der Stärke des magnetischen Feldes oder der Pole, an denen er vorbeibewegt wurde, vgl. Abbildung 22. Durch den Umstand,

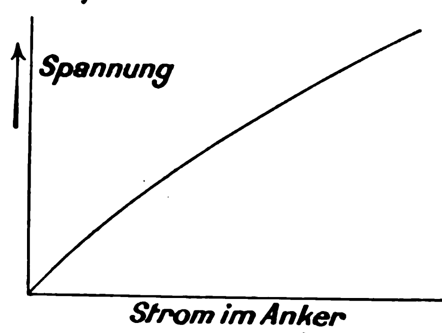


Abbildung 112. Spannungscharakteristik einer Hauptstromdynamo.

daß der Ankerstrom selbst dieses Feld erzeugen muß, folgt ohne weiteres, daß auch die Spannung klein ist bei kleinem Strom. Ja, sie würde genau proportional mit dem Ankerstrom wachsen, wenn nicht bei größeren Stromstärken die schon früher besprochene Sättigung des Eisens auf manchen Teilen des Kraftlinienweges eintreten würde. Da alsdann das magnetische Feld also langsamer als die Stromstärke ansteigt, zeigt auch die Spannung das in Abbildung 112 dargestellte Knie. Die Konstanthaltung der Tourenzahl bei einer Hauptstrom-Kraftübertragung kann man sich ferner dadurch anschaulich machen: Der Hauptstrommotor hat bei konstanter Klemmenspannung die Tendenz, mit sinkender Belastung immer rascher und rascher zu laufen (vgl. Abbildung 106), hier wird dem dadurch entgegengearbeitet, daß statt der konstanten Spannung mit sinkender Belastung eine immer kleiner und kleiner werdende Spannung an seine Klemmen gelegt wird.

Wickelt man auf die Pole einer Gleichstromdynamo gleichzeitig eine Wicklung, die vom Ankerstrom durchflossen wird, und eine, die im Nebenschluß zu der ganzen Netzspannung liegt, so entsteht die Compoundmaschine, deren Spannungscharakteristik naturgemäß einer Zusammensetzung derjenigen der Nebenschluß- und Hauptstromdynamo sein muß. Man kann die Wirkung der Hauptstromwicklung so stark machen, daß gerade der Spannungsabfall, den die Nebenschlußdynamo zeigt, durch sie ausgeglichen wird; erhöht man die Windungszahl der Hauptstromwicklung darüber hinaus, so entsteht die übercompoundierte Maschine, die z. B. bei voller Belastung eine Spannungssteigerung von 10—15 % zeigen kann. Man könnte annehmen, daß diese Compoundmaschine der gegebene Generator zur Versorgung von Lichtnetzen sein müßte, da ja gerade der Spannungsabfall bei voller Belastung des Netzes 10—15 % betragen kann. Dennoch finden wir derartige Compoundgeneratoren gerade in gewöhnlichen Zentralen nicht, doch werden die Gründe erst an späterer Stelle auseinandergesetzt werden können (Seite 353). Dagegen trifft man Compounddynamos häufig in Gleichstrom-Bahnzentralen an.

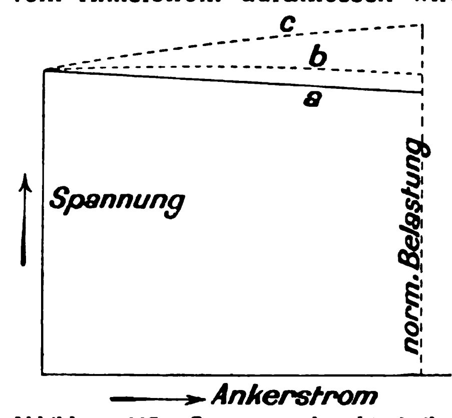


Abbildung 113. Spannungscharakteristik
a) einer Gleichstrom-Nebenschluß-Dynamo
b) einer compoundierten Gleichstrom-Dynamo
c) einer übercompoundierten Gleichstrom-Dynamo.

Gleichstrom-Wendepoldynamos begegnet man heute schon vielfach in den Fällen schwieriger Kommutierung, wenn auch weniger häufig als Wendepolmotoren; hauptsächlich werden Wendepole bei Dynamos von sehr variabler Spannung, sehr hoher Tourenzahl und sehr hohen Stromstärken angewandt. In diesen Fällen findet man sogar oft Wendepolmaschinen, deren Ankerströme außerdem noch durch besondere Wicklungen im Magnetgestell kompensiert sind. Den Ankerdrähten möglichst nahe gegenüber sind in den Polschuhen Wicklungen untergebracht, die ebenfalls vom Ankerstrom, aber in entgegengesetzter Richtung wie die Leiter im Anker selbst, durchflossen werden; die magnetische Wirkung der stromdurchflossenen Ankerleiter oder ihre magnetische Energie wird dann durch sie bis auf einen kleinen Rest aufgehoben. Eine solche Kompensationswicklung ersieht man aus Abbildung 114. Sie sind bei den Gleichstrom-Turbogeneratoren bisweilen empfehlenswert, weil bei der hohen Geschwindigkeit die Ströme in den einzelnen Leitern der Nuten sehr hohe Werte annehmen müssen. Derartige Wicklungen finden wir aber auch in anderen Fällen bei

Dynamos angewandt, wenn sich ihre Belastung nicht, wie im normalen Betriebe, nur ganz langsam im Verlauf von Minuten oder Viertelstunden ändert, sondern wenn, wie bei Walzenstraßen, Fördermaschinen usw., die Belastung innerhalb weniger Sekunden gewaltig schwankt. Im normalen Betriebe ändert sich die magnetische Energie um die Ankerleiter, die von den Ankerströmen hervorgerufen wird, eben nur ganz allmählich und kann sich daher ohne Störungen ausgleichen. Im zweiten Falle würde das rasche Anwachsen oder Verschwinden von magnetischer Energie um die Ankerleiter herum sich nur unter starken Funken an den Bürsten vollziehen können. Man setzt deshalb diese Energie durch die Kompensationswicklung auf ein Mindestmaß herab.



Abbildung 114. Magnetgestell eines Gleichstrom-Turbogenerators mit Wendepolen und Kompensationswicklung.

Da alle Umsetzung elektrischer Energie in mechanische reversibel ist, sind auch für Wechselstrom noch andere Dynamos als die früher beschriebenen normalen möglich.

Auch der Asynchronmotor kann als Dynamo wirken, wenn er mit einer höheren Tourenzahl angetrieben wird, als er selbst dann annehmen würde, wenn er ohne jede Belastung und ohne jede Reibung und andere Verluste als Motor arbeiten könnte. Die höchste Umdrehungszahl, die ein reibungsloser Motor annehmen könnte, ist wieder durch seine Polpaarzahl und die Periodenzahl des Wechselstroms bestimmt, es ist die Tourenzahl des Synchronismus. Es muß also schon durch irgendeine andere Dynamo die Periodenzahl im Netz gegeben sein, soll der Asynchronmotor überhaupt relativ rascher laufen und als Dynamo benutzt werden können. Häufig hat er daher als Dynamo noch nicht Verwendung gefunden. Auch die Wechselstrom-Kommutatormotoren können als Dynamos betrieben werden, doch werden auch sie technische Bedeutung nicht erringen können, da man stets den Kommutator so lange als möglich vermeiden wird.



Abbildung 115. Gleichstromdynamo der Siemens-Schuckert-Werke mit Wendepolen und Kompensationswicklung.

Eine Anzahl besonders interessanter Dynamos — in elektrischer Beziehung —, die gleichzeitig wirtschaftliche Bedeutung besitzen, gibt es aber doch. Viele Städte sind nach dem Dreileitersystem eingerichtet (Abbildung 116). Eigentlich sollten in der einen Netzhälfte immer genau so viel Glühlampen eingeschaltet sein wie in der anderen. Dann könnte der ganze Strom aus den Glühlampen der einen Netzhälfte sofort in der zweiten weiterfließen, der

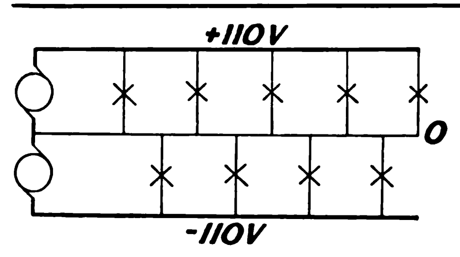


Abbildung 116. Dreileiteranlage mit 2 Maschinen.

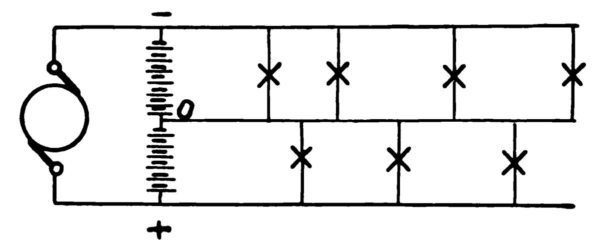


Abbildung 117. Spannungsteilung durch Akkumulatorenbatterien.

Nulleiter bräuchte gar nicht vorhanden zu sein, und statt der zwei Maschinen könnte eine einzige, doppelt so große von doppelter Spannung vorhanden sein. Sobald aber einseitig Lampen zu- oder abgeschaltet werden, muß Strom, wenn auch von verhältnismäßig geringer Stärke, im Nulleiter fließen, und wir müßten doch wieder die Spannung der großen Maschine entsprechend teilen. Das geschieht entweder durch Benutzung von Akkumulatoren (Abbildung 117) oder von zwei kleinen Hilfsmaschinen (Abbildung 118) oder einer einzigen Dynamo mit Spannungsteilung nach dem System von Dolivo-Dobrowolsky der Abbildung 119. Durch zwei Schleifringe wird neben dem Gleichstrom der Dynamo Wechselspannung entnommen und an einen Autotransformator, in diesem Falle auch Spannungsteiler genannt (Abbildung 120), gelegt. Ist die Abzweigung genau in der Mitte der Wicklungen erfolgt, so ist die Spannung bis zu jenem Punkte auch genau die Hälfte der Gesamtspannung. Der Wechselstrom, der durch den Autotransformator fließt, ist wegen der Selbstinduktion sehr gering. Diese kommt aber für den Gleichstrom, der durch den Nulleiter zurückzufließen sucht, nicht in Betracht. Die verschiedene Belastung des Netzes kann sich daher mit geringen Verlusten durch den Transformator und den Anker der Maschine hindurch ausgleichen.

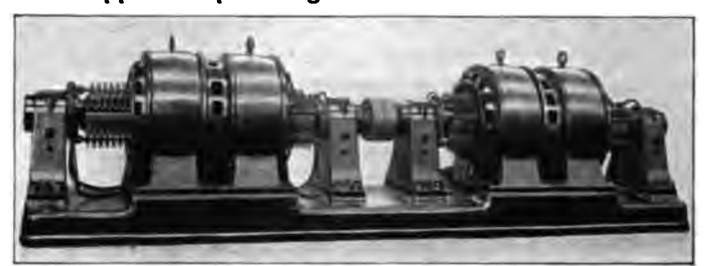


Abbildung 118. Spannungsteileraggregat, zugleich Lademaschinen. 2 Motor- und 2 Dynamoanker sind so auf 2 gekuppelten Wellen aufgekeilt, daß nur 4 Lager erforderlich sind.

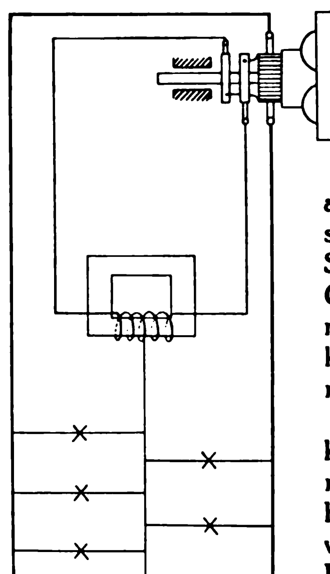


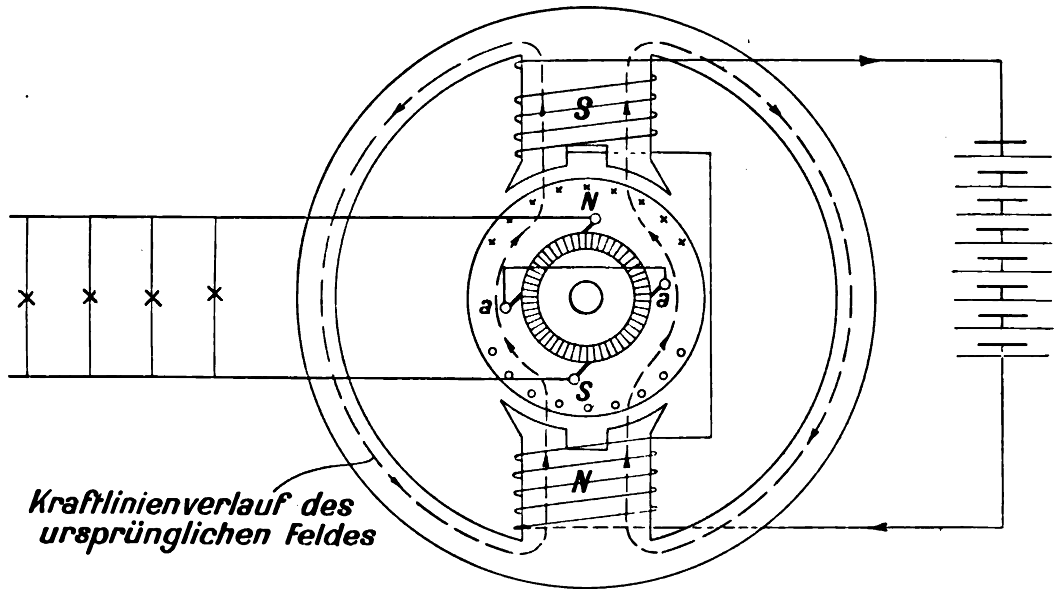
Abbildung 119. Schaltung der spannungsteilenden Dynamo nach Dolivo-Dobrowolski. (Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft.)

Recht schwierig wird das Problem der Erzeugung einer konstanten Spannung, wenn es unmöglich ist, den Antriebsmotor auf konstante Tourenzahl einzuregulieren. Das ist häufig unmöglich z. B. bei Windrädern, oder wenn man versuchen will, zur Beleuchtung von Eisenbahnzügen Dynamos sofort von der Achse jedes einzelnen Wagens anzutreiben. In beiden Fällen handelt es sich um Gleichstromdynamos, da sie mit Akkumulatorenbatterien zusammen arbeiten müssen. Denn immer, wenn entweder das Windrad oder der Eisenbahnzug stillsteht, muß die notwendige elek-

trische Energie natürlich einer anderen Quelle entnommen werden. Auf die Schwierigkeiten, die sich beim Parallelarbeiten mit einer Akkumulatorenbatterie und ihrer Ladung gerade bei variabler Tourenzahl ergeben, soll hier nicht näher eingegangen werden. Beide Probleme hat man zunächst mechanisch zu lösen versucht, indem man die Antriebsriemen bei zu hoher Tourenzahl veranlaßte, auf den Riemenscheiben zu gleiten oder dergleichen mehr. Allen solchen mechanischen sind die neuerdings gefundenen rein elektrischen Lösungen des Problems vorzuziehen, wie sie zuerst von Rosenberg angegeben worden sind. Er benutzt das sonst so lästige magnetische Feld des Ankers in außerordentlich eigenartiger Weise zu diesem Zwecke. Die beiden Bürsten a—a der Abbildung 121 entnehmen wie immer Strom solchen Ankerleitern, die sich zwischen den Polen befinden. Sie sind aber direkt miteinander verbunden, so daß sich ein starker Ankerstrom mit einem starken magnetischen Felde durch sie ausbilden kann. Nun bewegen sich die Leiter selbst in diesem Felde, und es entsteht auch zwischen den Bürsten b—b (der Abbildung 122) eine Spannungsdifferenz, die sofort verschwinden würde, falls wir die Bürsten a—a entfernen. Diese Spannung an den Bürsten b—b zeigt nun die gewünschte Eigenschaft, daß sie von der Tourenzahl der Maschine in weitesten Grenzen unabhängig ist, ebenso unabhängig ist aber dann der Strom, der von den Bürsten z. B. zur Speisung der Lampen im Eisenbahnwagen fließt. Zur Erklärung dieses zunächst so überraschenden Resultats hat man die Magnetfelder etwas genauer zu untersuchen, die einmal von dem erregenden Strom, zweitens von dem Kurzschlußstrom zwischen den



Abbildung 120. Drosselspule oder Autotransformator zur Spannungsteiler-Dynamo nach Dolivo-Dobrowolski. (Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft, Berlin.)



Abbild. 121. Schaltungsschema der Rosenberg-Dynamo. (Allgemeine Elcktrizitäts-Gesellschaft, Berlin.)

Bürsten a—a und drittens von dem Nutzstrom, der aus den Bürsten b—b fließt, hervorgerufen werden. Da ergibt sich nun, daß der Kurzschlußstrom ein magnetisches Feld erzeugt, dessen Richtung aus Abbildung 122 ersichtlich ist. Der Nutzstrom aber erzeugt ein Feld, das dem ursprünglichen Feld des Erregerstroms genau entgegengesetzt ist, ja, es fast ganz aushebt. Würde nun bei höherer Tourenzahl die Spannung an den Bürsten b—b und der Nutzstrom um einen irgendwie beträchtlichen Betrag steigen, so würde sogar das Erregerfeld vollständig aufgehoben werden müssen, aber dann könnte auch an den Bürsten a—a weder Spannung noch Strom mehr auftreten; die Erhöhung ist also in Wirklichkeit ausgeschlossen resp. findet nur in ganz geringem Maße statt. Die Stromrichtung aus den Bürsten b—b ist ferner von der Drehrichtung der Dynamo unabhängig. Denn bei entgegengesetzter Drehung kehrt wohl die Spannung a—a ihre Richtung um, damit aber auch der Kurzschlußstrom und das von ihm erzeugte magnetische Feld. Für die Bürsten b—b hat sich nun sowohl die Drehrichtung umgekehrt als auch die Richtung des magnetischen Feldes, beide zusammen erst rufen aber die Spannung hervor, und doppelte Umkehrung bedeutet gleiche Richtung wie vorher. Gerade die Unabhängigkeit von der Drehrichtung macht die Rosenberg-Dynamo besonders wertvoll für die Zugbeleuchtung, während andere Maschinen für denselben Zweck, z. B. die der Firma Oerlikon, eine mechanische Umsteuerung der Bürsten bei jedem Wechsel der Drehrichtung erfordern.

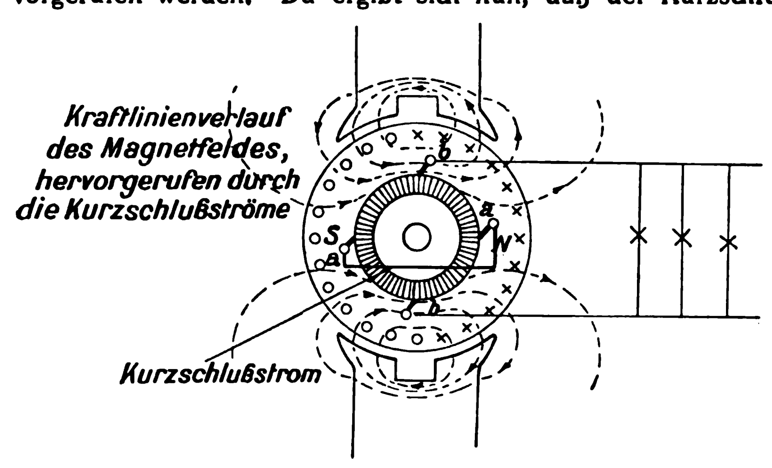


Abbildung 122. Ankerkraftfeld durch den Kurzschlußstrom in der Rosenberg-Dynamo.

Während wir in der Rosenberg-Dynamo eine Gleichstrommaschine kennen gelernt haben, welche konstante Spannung und konstanten Strom bei vollständig variabler Tourenzahl erzeugt, kann bisweilen auch das Verlangen vorhanden sein, bei **konstanter Tourenzahl** eine **konstante Stromstärke**, aber bei variabler Spannung, abzugeben. Man schaltete z. B. früher in Amerika zur Straßenbeleuchtung häufig viele Gleichstrom-Bogenlampen hintereinander und verlangte, daß man einige Lampen ausschalten konnte und alsdann die anderen bei geringerer Spannung, aber derselben Stromstärke, weiterbrennen sollten. Das Problem



Abbildung 123. Rosenberg-Dynamo für Zugbeleuchtung mit abgenommener Schutzkappe. (Allg. Elektr.-Ges., Berlin.)

wurde von Brush u. a. gelöst, doch ist man auch in Amerika immer mehr dazu übergegangen, auch für derartige Beleuchtungsanlagen Parallelschaltung verschiedener Bogenlampenkreise vorzusehen, d. h. man kam auf die normalen Verhältnisse einer konstanten Spannung bei variabler Stromstärke. Die Frage würde heute nur bei ganz besonderen Verhältnissen auftauchen, z. B. der Beleuchtung von langen Kanalstrecken, besonders wenn nicht sämtliche Lampen die ganze Nacht durch brennen sollen.



Abbildung 124. Anker einer Gleichstrom-Turbodynamo der Maffei-Schwartzkopff-Werke, Berlin. Die Köpfe der Ankerspulen sind durch Bronzekappen, der Kommutator durch isolierte Stahlringe gehalten.

Das Problem der Kraftübertragung ist in Europa von einem einzigen Ingenieur, nämlich Thury in Genf, ebenfalls durch Gleichstromgeneratoren (und -Motoren) für konstanten Strom bei konstanter Tourenzahl, aber variabler Spannung, gelöst worden, und zwar wieder nur für den besonderen Fall, daß Energie von einem Punkte allein zu einem anderen zu übertragen ist. Er wollte die geringen Verluste der Hochspannungsfernleitung, die sonst nur mit Wechselstrom zu erreichen sind, mit den Vorzügen des Gleichstroms, nämlich konstantem Strom und dem Fortfall jedes Leistungsfaktors, vereinigen. Da nun bisher in einer einzigen Maschine nicht mehr als 2000—3000 Volt wegen der Gefahr für den Kommutator erzeugt werden konnten, stellte er eine ganze Reihe derartiger Maschinen auf, isolierte sie sorgfältig voneinander und schaltete sie nach Bedarf hintereinander. So wird Energie von St. Maurice nach Lausanne durch Gleichstrom bei maximal 23000 Volt übertragen, indem zehn Generatoren oder Motoren zu je 2300 Volt an beiden Endstellen hintereinandergeschaltet werden können. Die Konstanthaltung der Stromstärke wird durch besonders sinnreich konstruierte Regulatoren bewirkt.

MECHANISCH INTERESSANTE MASCHINEN. Will man einen Überblick über den heutigen Stand des Elektromaschinenbaues gewinnen, so genügt es nicht, außer den normalen Maschinen diese elektrisch interessanten Motoren und Generatoren ins Auge zu fassen. Es sind auch noch die konstruktiv interessanten Ausführungen zu nennen, welche die Bedürfnisse der heutigen Technik gezeitigt haben. Unter den Generatoren sind von diesem Standpunkt aus besonders interessant diejenigen für Dampfturbinenantrieb. Hier waren konstruktiv große mechanische Schwierigkeiten zu überwinden. Die Massen sind für so hohe Tourenzahlen aufs sorgfältigste auszugleichen, so daß kein Druck auf die Lager durch die Zentrifugalkräfte entstehen kann. Es ist aber ebenso natürlich zu verlangen, daß dieses sorgfältig in der Fabrik hergestellte Gleichgewicht auch im Betriebe durch Verschiebungen der Wicklungen usw. niemals gestört wird. Bei den hohen Tourenzahlen ist die Luftreibung ferner möglichst gering zu halten, d. h. es sind alle vorspringenden Teile nach Möglichkeit zu vermeiden, anderseits ist die



Abbildung 125. Anker einer Gleichstrom-Turbodynamo der Allg. Elektr.-Ges., Berlin. Hier sind die Spulenköpfe durch Drahtbandagen gehalten. Auf der Welle eine besondere kleine Gleichstrom-Erreger-Dynamo.



Abbildung 126. Polgehäuse für Gleichstrom-Turbodynamo mit kombinierter Luft- und Wasserkühlung. (Allg. Elektr.-Ges., Berlin.)

Fortführung der erzeugten Wärme nicht leicht. In den Drehstromgeneratoren für Turbinenantrieb ist besonderes Gewicht auf die feste Lagerung auch der stillstehenden Spulenköpfe im äußeren Gehäuse zu legen wegen der großen mechanischen Kräfte bei möglichen Kurzschlüssen. Eine Konstruktion von Gleichstrom-Turbogeneratoren ist schon in Abbildung 114 gegeben worden, eine andere ersieht man aus Abbildung 126, Polkranz- und Spulenanordnung eines Drehstromgenerators für Turbinenantrieb gibt Abbildung 127—130. Es sind bei den dargestellten „Induktoren" nur zwei Pole vorhanden und mit Wicklungen versehen; alle Zwischenräume sind zur Verminderung des Luftwiderstandes vollständig vermieden, so daß sich der Polkranz scheinbar in einen einfachen Zylinder verwandelt hat.

Ähnliche mechanische Schwierigkeiten bieten bei den Motoren diejenigen zum Antrieb von raschlaufenden Zentrifugal-Hochdruckpumpen oder für Ventilatoren. Bei den Motoren hat sich ferner das Bestreben geltend gemacht, die Schaltapparate möglichst organisch mit ihnen zu verbinden. Man verlangt z. B. häufig, daß auch größere Drehstrommotoren mit einem einzigen Handrad angelassen werden können, das dann nacheinander folgende Forderungen zu erfüllen hat: Erstens ist zunächst die Spannung an den Stator anzulegen, dann ist die Rotorwicklung auf Anlaßwiderstände zu schalten, diese sind allmählich auszuschalten, wenn die Maschine auf Touren kommt. Sind alle Widerstände ausgeschaltet, so sind weiter die Schleifringe direkt innerhalb der Maschine miteinander metallisch zu verbinden oder kurz zu schließen, und schließlich sind noch die Bürsten von den Schleifringen abzuheben. Beim Drehen des Handrades in der entgegengesetzten Richtung, um den Motor stillzusetzen, müssen die genannten Schritte in umgekehrter Reihenfolge erfolgen, so daß jeder ungeübte Ar-

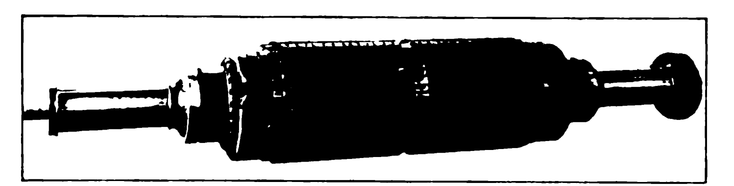
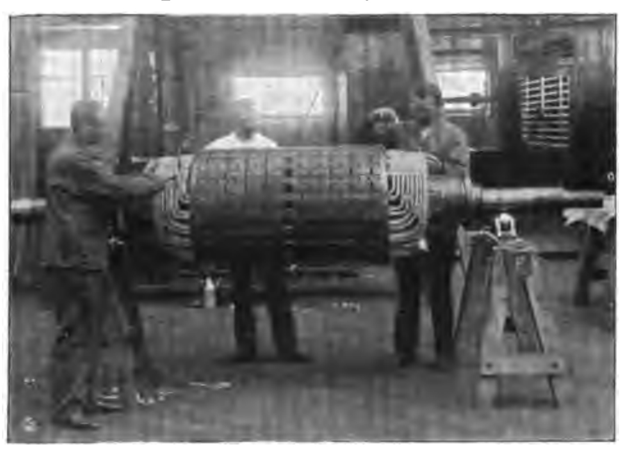


Abbildung 127. Der noch ungewickelte genutete Zylinder stellt das Polrad einer Drehstrom-Turbodynamo vor. Die Wicklung wird so angeordnet, daß der halbe Zylinder ein Nordpol, die andere Hälfte ein Südpol ist. Ausführung der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft, Berlin.



Abbild. 128. Polzylinder eines Drehstrom-Turbogenerators, in diesem Falle meist „Induktor" genannt, in der Wickelei. Fabrikat der Maffei-Schwartzkopff-Werke, Berlin.

beiter den Motor betätigen kann.



Abbildung 129. Fertiger Induktor der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft, Berlin, für Drehstrom-Turbodynamo (vgl. Abbild. 127).

Ein weiterer Gesichtspunkt zum Verständnis des heutigen Elektromaschinenbaues ist der, daß man, wenn möglich, die anzutreibende Maschine mit dem Elektromotor organisch zusammenbaut. So haben sich besondere Formen zum Betrieb der Ventilatoren, Pumpen, Rotationspressen, der Webstühle und vieler anderer Arbeitsmaschinen ausgebildet.

Andere Anforderungen in konstruktiver Hinsicht werden wiederum gestellt, wenn es sich um Motoren handelt, die in feuergefährlichen Räumen oder solchen mit Säuredämpfen Aufstellung finden sollen. Für diese Zwecke baut man die halb- oder ganzgekapselten Maschinen, bei säurefesten Motoren ist daneben noch auf die Wahl des Materials weitgehende Rücksicht zu nehmen. Halbgekapselte Maschinen sind solche, die zur Ventilation noch Öffnungen haben, diese sind aber durch Gazegitter so abgeschlossen, daß eine Entzündung im Innern durch Funken am Kommutator oder an den Schleifringen sich nicht auf den Außenraum fortpflanzen kann. Für derartige Zwecke sind Drehstrommotoren mit Kurzschlußankern selbstverständlich allen anderen überlegen, aber auch an Schleifringen treten Funken nicht leicht auf. Ganzgekapselte Maschinen müssen die ganze Wärme ausstrahlen ohne die Vermittlung durchstreichender Luft. Sie leisten daher bedeutend weniger als normale Motoren gleicher Größe. Kapselung der Maschinen wird auch häufig umgekehrt im Interesse der Maschinen selbst notwendig, wenn es sich um sehr staubige oder sehr feuchte Räume handelt.



Abbildung 130. Gehäuse einer Drehstrom-Dynamo für Turbinenantrieb. (Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft, Berlin.)

Man kann zusammenfassend sagen: Während in früheren Zeiten die elektrische Konstruktion auch der normalen Maschinen in den Wicklungen, in der Form der Magnetgestelle und in der Form der Anker und Kommutatoren große Mannigfaltigkeit aufwies, herrscht heute in diesen Punkten eine recht große Übereinstimmung; es ist wohl eine große Anzahl neuer elektrischer Probleme gelöst worden, aber mit konstruktiv äußerlich wenig abweichenden Formen. Die Abweichungen in der äußeren Gestalt dagegen sind die Folge der verschiedensten äußeren mechanischen Umstände.



Abbildung 131. Drehstrommotor, 28 P.S., 115 Volt, 1440 U.P.M.; 50 Perioden mit Schleifringanker, Bürstenabhebevorrichtung, angebauter Steuerwalze und dreipoligem Primärausschalter. Fabrikat der Siemens-Schuckert-Werke.

GRÖSZE DER MASCHINEN. Zum Schluß ist es wohl interessant, über die



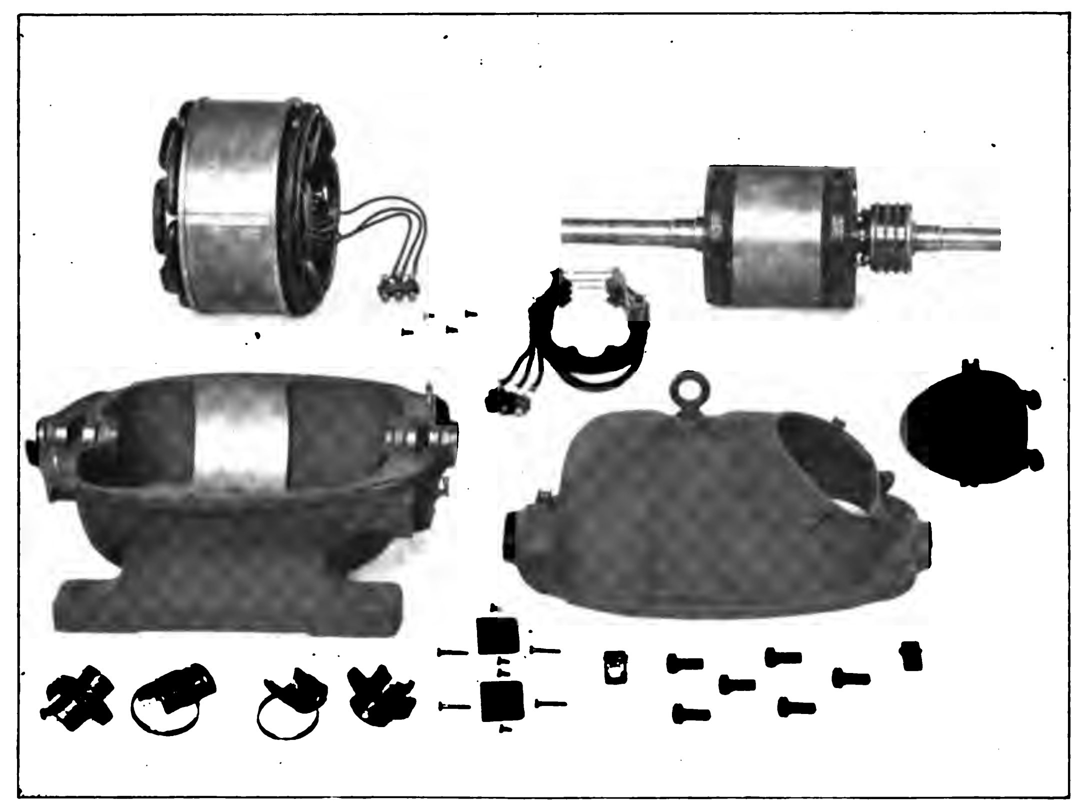


Abbildung 132. Antrieb einer großen Zeitungsrotations-Schnellpresse für die Zeitung „Le Matin“, Antwerpen, geliefert von den Siemens-Schuckert-Werken.



Abbildung 133. Schwingender Webstuhlmotor der Elektrotechnischen Fabrik Rheydt, vorm. Max Schorch.

Größe der heute hergestellten Maschinen einige Daten zusammenzustellen. Die kleinsten Transformatoren werden etwa zum Betrieb einer einzigen Glühlampe für



Abbild. 134. Zerlegter gekapselter Drehstrommotor mit Schleifringanker: 20 P.S., 500 Volt, 575 U.P.M. Fabrikat der Siemens-Schuckert-Werke.

30—50 Watt hergestellt, während die größten 10 Millionen Watt oder 10000 Kilowatt und sogar mehr Energie umsetzen. Die kleinsten Motoren werden mit einer Leistung von etwa $\frac{1}{20}$ P.S. gebaut, die bisher größten Motoren sind solche von 3000—5000 P.S., von denen aber zuweilen mehrere auf derselben Achse vereinigt werden (Abbildung 210). Bahnmotoren von 1500 P.S. kommen verschiedentlich vor. Die Gleichstromdynamos baut man bis Größen von etwa 5000 Kilowatt Leistung, während die Drehstromgeneratoren für noch größere Einheiten gebaut worden sind. Gerade mit der Entwicklung der Dampfturbine, die auf kleinem Raum angewaltige Energiemengen umsetzen kann, hat auch die Entwicklung des Drehstromgenerators gleichen Schritt gehalten. Die größten Einheiten sind neuerdings in Amerika sowohl wie in Deutschland für etwa 20000 Kilowatt bestellt und ausgeführt worden. Die elektrischen Maschinen eignen sich also besser wie alle anderen dazu, sowohl größte wie kleinste Energiemengen in zufriedenstellender Weise umzusetzen.



Abbildung 135. Vollständig gekapselter Drehstrommotor, 65 P.S., 500 Volt, 585 U.P.M.; mit angebauter Steuerwalze und Amperemeter der Siemens-Schuckert-Werke, Berlin.

3. DIE ELEKTRISCHEN LICHTQUELLEN

DIE HISTORISCHE BEDEUTUNG DER GLÜHLAMPE UND DIE GRUNDLAGEN DER WÄRMESTRAHLUNG. Wenn auch die Bedeutung der Übertragung elektrischer Energie für mechanische Zwecke heutigentags immer mehr zunimmt, so hat die Elektrotechnik doch nicht diesem Umstand, also den Elektromotoren, ihre Entstehung und Entwicklung zu verdanken; vielmehr war es bekanntlich die Erzeugung des elektrischen Lichtes, welche die elektrischen Maschinen in den siebziger Jahren des vorigen Jahrhunderts aus einem interessanten Apparat des Physikers in die wirtschaftlich wertvolle Arbeitsmaschine verwandelte. Und zwar war es die Erfindung der Kohlenfadenglühlampe durch Edison, die diesen Umschwung herbeiführte. Noch heute heißen die größten städtischen Zentralen Nordamerikas „Edison Illuminating Companies". Die Teilbarkeit des elektrischen Lichtes, die Bequemlichkeit des Anzündens, das Fehlen jeder Belästigung durch verbrannte Gase, die Möglichkeit, die Lampen in jeder Stellung und Höhe und beliebiger Zusammensetzung anzubringen, alle diese Vorzüge bewirkten ein rasches Fortschreiten der elektrischen Beleuchtung trotz des zunächst außerordentlich hohen Preises. Rechnete man nach, wieviel Licht die Kohlenfadenlampe für ein bestimmtes Energiequantum lieferte, und stellte man diese Energie in Vergleich zu anderen damals existierenden Lichtquellen wie Argandbrenner, Petroleumlampen usw., so übertraf die Ökonomie des neuen Lichtes die alten freilich um ein beträchtliches. Dieser Vorteil wurde aber aufgehoben durch den höheren Preis der elektrischen Energie, die in ihrer komplizierteren Erzeugung und Verteilung bedingt ist. Dennoch trat wegen der genannten Vorteile das elektrische Licht seinen Siegeszug an. Vom rein physikalischen Standpunkt ist ein grundlegender Unterschied zwischen der Glühlampe und der Petroleumlampe oder Gasflamme nicht vorhanden. Stets handelt es sich um eine Wärmestrahlung, d. h. um Körper, welche, auf hohe Temperatur gebracht, Strahlen aussenden, die unser Auge als Licht empfindet. Noch eine zweite Art des Lichtes werden

wir bei der Betrachtung der elektrischen Lichtquellen kennen lernen, nämlich die Lumineszenzstrahlung, auch „kaltes Licht" genannt, die wir in evakuierten sogenannten Geislerröhren bei Durchgang des elektrischen Stroms finden und vielleicht in der Natur in dem Lichte wiederfinden, welches die Leuchtkäfer ausstrahlen und jene unzähligen Infusorien, welche das herrliche Schauspiel des Meeresleuchtens hervorrufen. Über das Wesen dieser Strahlung oder Strahlungsarten sind wir noch recht im Dunkeln, während wir die Temperaturstrahlung als eine Vibration der kleinsten Teile der Materie, der Moleküle, infolge ihrer Wärme auffassen. Bei weitem die meisten unserer heutigen elektrischen Beleuchtungsarten beruhen auf der Temperaturstrahlung, und die Ähnlichkeit des Lichtes der alten Glühlampen mit demjenigen der Petroleumlampe usw. geht so weit, daß es beide Male Kohlenstoff ist, der nur auf verschiedene Weise in rot- oder weißglühenden Zustand versetzt wird und die Lichtstrahlen aussendet. Will man die wichtige Frage der Ökonomie einer Lichtquelle untersuchen, so ist eine etwas eingehendere Beschäftigung mit den Gesetzen unserer Lichtempfindung einerseits, der Aussendung der Energie durch Strahlen anderseits erforderlich. Wir wissen heute, daß die von der Sonne oder irgendeiner anderen Lichtquelle zu uns gelangenden Strahlen elektromagnetischer Natur sind. Sie beruhen auf der Fortpflanzung von Schwingungen, deren Träger uns unbekannt ist und den man sich gewöhnt hat, als hypothetischen Lichtäther zu bezeichnen. Jeder Körper sendet nun je nach seiner Temperatur alle möglichen Wellenbewegungen aus, die sich nur nach ihrer Länge oder Zahl pro Sekunde unterscheiden. Nach unserer heutigen Auffassung besteht sogar kein wesentlicher Unterschied zwischen all diesen Strahlen und den von uns in der drahtlosen Telegraphie erzeugten elektromagnetischen Wellen. Obgleich aber wesensgleich, ist unsere subjektive Empfindung der Strahlen und ihre objektive Umwandlungsfähigkeit in andere Energieformen je nach ihrer Länge verschieden. Unser Auge empfindet nur solche elektromagnetischen Wellen als Licht, deren Länge 0,0004—0,0008 mm beträgt. Gerade die Strahlen der Sonne, welche die größte Energie besitzen, gehören zu denjenigen, welche unser Auge als Licht empfindet, oder besser gesagt, hat sich unser Auge so eingestellt, daß es nur auf die hervorragenden Energieträger unter den Sonnenstrahlen reagiert. Außer der Empfindung des Lichtes bringen Strahlen auch die der Wärme hervor, d. h. die elektromagnetische Energie der Strahlung läßt sich in Wärme umsetzen. Bekanntlich zerlegt man das Licht durch ein brechendes Prisma in das sogenannte Spektrum. Das sichtbare Spektrum der Sonne ist nur etwa der fünfzigste Teil des ganzen nachzuweisenden Spektrums, das dann nicht durch seine Lichtwirkung auf unser Auge, sondern nur durch die Wärmewirkung nachzuweisen ist. Unter der Ökonomie einer Lichtquelle können wir also das Verhältnis verstehen, in dem die Energie im sichtbaren Spektrum zur Gesamtenergie aller Strahlen steht. Je größer dies ist, um so ökonomischer ist unsere Lichtquelle. Die Umwandlungsfähigkeit in Wärme nimmt zu, wenn wir durch das Spektrum von Blau zu Rot übergehen, und erreicht jenseits des sichtbaren Spektrums in den sogenannten ultraroten Strahlen ihr Maximum. Noch eine dritte Art der Wirkung der Lichtstrahlen unterscheidet man, nämlich ihre chemische Wirksamkeit, d. h. die Umwandlung ihrer Energie in chemischen Prozessen, z. B. in einer photographischen Platte. Diese Umwandelbarkeit steigt umgekehrt mit der Kürze der Wellenlängen, d. h. wenn wir uns vom roten Teil des Spektrums nach dem blauen zu und darüber hinaus begeben, um nachher wieder abzufallen. Einen interessanten Beleg dafür, daß Licht-, Wärme- und chemische Wirkung der Strahlen nur eine der Art und Intensität nach verschiedene Umwandlung derselben Energieform ist, kann man in der neuerdings gemachten

Entdeckung finden, daß schon bei 185° Körper, z. B. Metalle, sowohl Wärme- wie chemisch wirksame Strahlen in einem vollständig dunklen Raume aussenden, d. h. man kann die Körper sich auf einer photographischen Platte abbilden lassen, also lange bevor man auch nur den geringsten Lichteindruck von ihnen empfängt. Die Untersuchungen von Helmholtz, Lummer und Pringsheim haben genau die Gesetze kennen gelehrt, nach denen sich die Energie ändert, welche ein erhitzter Körper in den Strahlen der verschiedenen Wellenlängen je nach seiner Temperatur aussendet. Der Anteil an „Lichtstrahlen", d. h. an Strahlen, die auf unser Auge wirken, nimmt mit der Temperatur des leuchtenden Körpers in starkem Maße zu. Nach Lummer muß die Sonne eine Temperatur von etwa 8000° besitzen, und würden wir irdische Körper auf dieselbe Temperatur bringen können, so würden wir die größtmögliche Ökonomie mit unseren Lampen erreicht haben, falls wir eben Temperaturstrahlung verwenden. Je geringer die Temperatur ist, desto geringer ist die Energie der Lichtstrahlen im Vergleich zu der der Wärmestrahlen und damit die Ökonomie der Lampe. Das Bestreben der ganzen elektrischen Beleuchtungstechnik ging und geht daher darauf aus, immer höhere Temperaturen in den Leuchtkörpern zu erzeugen, d. h. zu immer widerstandsfähigerem Material zu gelangen, solange es sich überhaupt noch eben um das Problem der Temperaturstrahlung handelt. In Abbildung 136 ist die ausgestrahlte Energie in Abhängigkeit von der Wellenlänge für verschiedene Temperaturen, und zwar eines vollständig schwarzen Körpers nach den Versuchen von Lummer und Pringsheim angegeben.

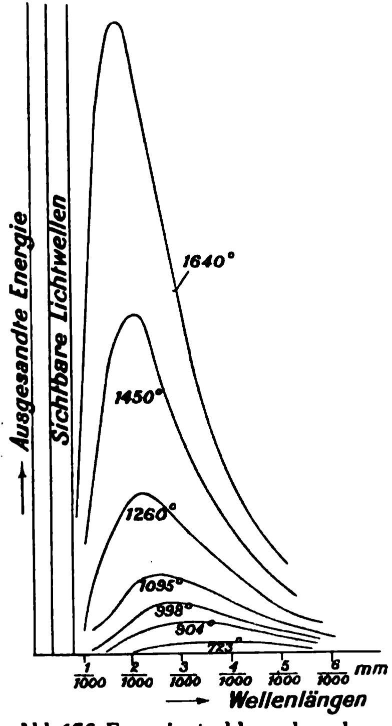


Abb.136. Energiestrahlung des schwarzen Körpers bei verschiedenen Temperaturen nach Lummer-Pringsheim.

Die Einheit der Lichtstärke. Während die gesamte ausgesandte Strahlungsenergie gerade durch ihre Umwandlungsfähigkeit in Wärme gemessen wird, bestimmt man die Lichtwirkung einer Lampe durch Vergleich (Photometrierung) mit einer Lichtquelle von stets gleicher Größe und Intensität. In verschiedenen Ländern existieren verschiedene Einheiten, in Deutschland gilt die von Hefner-Alteneck angegebene Lichtquelle als Normaleinheit und wird Normalkerze oder Hefnereinheit genannt. Sie ist eine Flamme von 25 mm Höhe, in der Amylacetat verbrennt. Das Brennmaterial wird durch einen Docht von 8 mm Durchmesser zugeführt. Man spricht daher von Glühlampen von 16, 25, 50 Normalkerzen, während z. B. Bogenlampen eine Lichtstärke von vielen tausend Kerzen besitzen können.

DIE KOHLENFADENGLÜHLAMPE. Die Kohlenfadenglühlampe wird für 220, 110 Volt und niedrigere Spannung hergestellt, sie besitzt eine Temperatur von etwa 1900°, ist also noch sehr weit von der erwünschten Temperatur der Sonne entfernt. Sie verbraucht ca. 3 Watt pro Hefnerkerze, also bei der sehr häufig vorkommenden Lichtstärke von 16 Kerzen rund 50 Watt. Man könnte freilich die Ökonomie der Lampe bedeutend vergrößern, wenn man ihre Temperatur dadurch steigerte, daß man bei höherer Spannung einen größeren Strom durch sie hindurchzwänge und so die

in dem Faden umgewandelte Wärme erhöhte. Außer der Ökonomie spielt aber noch eine zweite Frage eine bedeutende Rolle, das ist die Lebensdauer der Lampe. Bei allen Kohlenfadenlampen mit größerer Ökonomie sinkt nun die Lebensdauer, und es ist eine Frage der Herstellungskosten und des Strompreises, ob es besser ist, unökonomische Lampen von langer Lebensdauer oder ökonomische von kurzer zu benutzen. In der Praxis der Kohlenfadenlampen ist man jedenfalls nicht wesentlich unter den Energieverbrauch von 3 Watt hinuntergegangen und erhält bei 65 Pf. Anschaffungswert der Lampe eine Lebensdauer von etwa 2000 Stunden. Berechnet man den Wattverbrauch einer Lampe für den Fall, daß die angelegte Spannung so hoch gewählt wird, daß die Lampe schon nach einer Sekunde zerstört wird, so ergibt sich der außerordentlich geringe Energieverbrauch von 0,2 Watt pro Hefnerkerze. Gegen die Steigerung der Temperatur der Kohlenfäden auf Kosten ihrer Lebensdauer spricht dann vor allem der Umstand, daß bei den höheren Temperaturen Kohlenstoffpartikelchen abgeschleudert werden, die Glasbirne der Lampe schwärzen und dadurch die Lichtausbeute stark heruntersetzen. Außerdem werden die Fäden dadurch dünner, ihr Widerstand steigt, die in Wärme umgesetzte Energie wird prozentual größer.

Herstellung der Lampen. Die Lampe besteht 1. aus der Birne und dem Sockel aus Glas, 2. dem gestanzten Fußkontakt und der mit Gips ausgegossenen Sockelschraube (meist mit Edison-Gewinde) und 3. dem eigentlichen Kohlefaden, der an zwei Platinstifte angelötet ist. Während die Herstellung der Glas- und Metallteile leicht verständlich ist, beruht in der Herstellung des Kohlefadens das Schwergewicht der Fabrikation. Von den außerordentlich vielen Wegen, die zur Herstellung eines Kohlefadens eingeschlagen worden sind, haben sich besonders drei im Laufe der Zeit bewährt, es sind: das Nitrozellulose-, das Chlorzink- und Kupferoxydammoniakverfahren. Der Zweck aller Verfahren ist der, zunächst Kohlenstoff derart in irgendeine chemische Verbindung zu bringen, daß diese plastisch wird, d. h. durch kleine Öffnungen (Düsen) hindurchzupressen ist. Durch eine besondere Flüssigkeit muß die plastische Masse erstarren oder koagulieren, alsdann müssen die Fäden gewaschen und eventuell chemisch behandelt werden. Als vierter Prozeß folgt das Aufwickeln, Abschneiden und Messen der Fäden, als fünfter ihr Biegen und als sechster schließlich die vollständige Umwandlung des Fadens, der bisher noch andere chemische Bestandteile enthält, in reinen Kohlenstoff (Karbonisieren). In derselben Zeit müssen die Glassockel mit den Platinstiften und die übrigen Teile ebenfalls hergestellt worden sein, die Kohlefäden werden nun an die Platinstifte angelötet und in die Glasbirnen hineingebracht. Ehe der letzte Prozeß, nämlich das Evakuieren oder Auspumpen der Glasbirnen und das Zuschmelzen vorgenommen wird, werden die einzelnen Fäden noch besonders „präpariert", d. h. sie erhalten dadurch einen gleichmäßigeren Querschnitt, daß sie in einer kohlenstoffreichen Atmosphäre (von Kohlenwasserstoffen) zum Glühen gebracht werden. War der Faden noch ungleichmäßig, so glühen zunächst die verschiedenen Stellen verschieden stark. An dünneren und dadurch heißeren Stellen schlägt sich aber Kohlenstoff nieder, so daß nach kürzerem Brennen der Faden eine gleichmäßige Helligkeit zeigt. Nachdem die Luft ausgepumpt und das Glaszuführungsrohr abgeschmolzen ist, kann die Helligkeit der Lampe noch photometriert und der Sockel entsprechend gezeichnet werden, z. B. 32/220 = 32 Normalkerzen bei 220 Volt Spannung. Die einzelnen Verfahren unterscheiden sich in der Hauptsache nur in der Herstellung der kolloidalen Lösung und den darauffolgenden chemischen Prozessen. So besteht das Nitrozelluloseverfahren zunächst in der Herstellung der Lösung aus Kollodiumwolle, Eisessig und Alkalikarbonat. Spritzt man

diese Masse in Wasser, so erhält man gelbliche biegsame, aber feste Fäden, die nun mit Wasser gewaschen und Schwefelammonium von dem Stickstoff befreit oder denitriert werden. Beim Chlorzinkverfahren bildet reine Baumwollwatte in Chlorzinklauge die kolloidale Masse, an die Stelle des Wassers tritt 70 % Alkohol als sogenannte Koagulierflüssigkeit. Beim Kupferoxydammoniakverfahren schließlich wird reine Baumwollwatte in Kupferoxydammoniak gelöst und diese Masse in verdünnte organische oder anorganische Säuren eingespritzt. Bei der Umwandlung in Kohlenstoff erhalten sämtliche Fäden ein glänzend graues, fast metallisches Aussehen, ihre Festigkeit ist eine außerordentlich hohe, wie wir sie ja täglich allen Stößen der elektrischen Straßenbahnen Widerstand leisten sehen. Je höher freilich die Spannung ist, um so dünner und länger müssen die Fäden für eine bestimmte Kerzenstärke werden und desto empfindlicher werden sie auch gegen Stöße. Über 220 Volt ist man daher bei Glühlampen nicht hinausgegangen, und in den elektrischen Wagen der Bahn, die doch mit 550 Volt mindestens arbeiten, sind oft bis zu fünf Lampen hintereinandergeschaltet. Die kleinsten Lampen, die man für 110 Volt herstellt, sind 10kerzige, für 220 Volt meist 16kerzige Glühlampen. Für Illuminations- oder Reklamezwecke, wo es auf eine Verteilung möglichst vieler kleiner Lichtkörper ankommt, schaltet man wieder eine größere Anzahl Lampen von weniger Kerzenstärken und geringerer Spannung hintereinander.

DIE METALLFADENLAMPEN. Einen großen Schritt vorwärts in der Ökonomie der Glühlampen bedeutete es, als es Auer von Welsbach gelang, Fadenlampen aus Metall, und zwar aus dem schwer schmelzbaren Osmium, herzustellen. Mit einer Steigerung der Temperatur sind hier die Nachteile einer raschen Zerstörung wie bei der Kohlenfadenlampe nicht verbunden. Es gelang, bis auf 1 Watt Energieverbrauch und weniger pro Kerzenstärke zu kommen, freilich unter Überwindung ganz außerordentlicher technischer Schwierigkeiten. Die Metallfäden besitzen einen viel geringeren spezifischen Leitungswiderstand als Kohlenfäden, sie müssen daher ganz bedeutend feiner und länger für dieselbe Spannung und Kerzenstärke hergestellt werden. Das Ziehen der Fäden bis zu den notwendigen Durchmessern herab erwies sich aber gerade bei den sehr schwer schmelzbaren Metallen als sehr schwierig. Die Siemens-Schuckert-Werke zogen Tantal tatsächlich zu Fäden aus und erhielten damit die mechanisch ziemlich haltbaren Tantallampen von etwa 1,4 Watt Energieverbrauch pro Hefnerkerze, und erst ganz neuerdings gelingt das Ziehen auch mit anderen zur Fabrikation brauchbaren Metallen. Lange Zeit dauerte es aber, bevor man Lampen auch für eine höhere Spannung als 110 Volt anfertigen konnte. Die jetzige Tantallampe für 220 Volt besteht z. B. eigentlich aus zwei übereinandergesetzten 110voltigen Lampen. Soll der Faden nicht allzu dünn und gegen Stöße empfindlich sein, so ist im Augenblick bei einer Spannung von 220 Volt noch eine Mindestkerzenstärke von 50 empfehlenswert, der Stromverbrauch ist dann wieder etwa derselbe wie bei den früheren 16kerzigen Kohlenfadenlampen, man erhält aber dafür etwa die dreifache Lichtstärke. Nach den ersten günstigen Erfolgen der Metallfadenlampen schossen Patente und Fabriken zu ihrer Herstellung wie Pilze aus der Erde. Außer dem

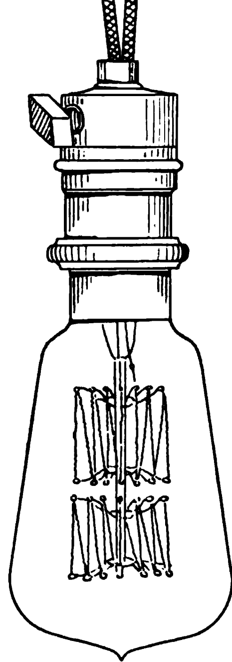


Abbildung 137. Tantallampe für 220 Volt d. Siemens-Schuckert-Werke.

Osmium und dem Tantal wurde das Wolfram, das Zirkon und andere schwer schmelzbare Metalle zu der Herstellung der neuen Lampen herangezogen, und bei der Neuheit der Industrie sind die Wege der Herstellung noch recht verschieden und werden zum Teil streng geheimgehalten. Außer dem direkten Ziehen der Metalle, das bei ihrer Härte außerordentlich schwierig ist, sind wohl bisher noch folgende Wege zur Herstellung geeigneter Metallfäden eingeschlagen worden. Es werden dem zu ziehenden Metall einige Prozent von anderen beigemischt, die es geschmeidiger machen. Es werden Kolloide der Metalle hergestellt und die plastische Masse durch Düsen zu Fäden gepreßt. Die Fäden sind aber in diesem Zustande nicht leitend, werden sie dagegen in Wasserstoff erhitzt, so tritt eine schwache Leitfähigkeit ein, nun wird Strom zu immer weiterer Erwärmung bei Herabsetzung des Widerstandes hindurchgeschickt, die fremden Bestandteile gehen mit dem Wasserstoff Verbindungen ein, und so wird fortgefahren, bis allein der reine Metallfaden übrigbleibt. Nach einer anderen Methode preßt man Verbindungen des betreffenden Metalls in Pulverform zu Fäden, das dann durch irgendein Bindemittel zusammengehalten wird. Auch hier haben nachträglich chemische Behandlungen und Erhitzen in einer Wasserstoffatmosphäre stattzufinden. Eine weitere Art ist das Niederschlagen des Metalls auf Kohlefäden, man spricht dann von metallisierten Kohlefäden. Eventuell kann die Kohle auch nachträglich entfernt werden. Ein Vorteil der Metallfadenlampen liegt darin, daß ihr Widerstand mit der hindurchgehenden Stromstärke und der höheren Temperatur, die diese hervorruft, zunimmt. Kohle zeigt dagegen gerade das umgekehrte Verhalten, ihr Widerstand nimmt mit der Stromstärke ab. Wird daher die Spannung im Netz einmal zu hoch, so steigt die Energieaufnahme der Kohlenfadenlampen in hohem Maße, und ihre Lebensdauer wird durch solche Überlastungen herabgesetzt. Eine Metallfadenlampe dagegen, deren Stromstärke bei steigender Spannung wegen des gleichzeitig steigenden Widerstandes nicht so stark zunimmt, ist gegen die Spannungsschwankungen unempfindlicher. Die Fabrikation der Metallfadenlampen hat in den letzten Jahren einen ungeahnten Aufschwung genommen und sich auch mit der Herstellung stärkerer Lichtquellen bis zu 500 und 1000 Kerzenstärken befaßt.

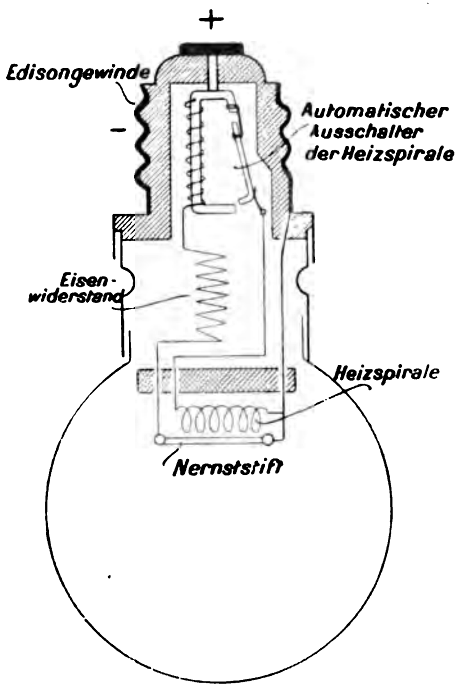


Abbildung 138. Schematische Darstellung der Schaltung einer Nernst-Lampe der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft, Berlin.

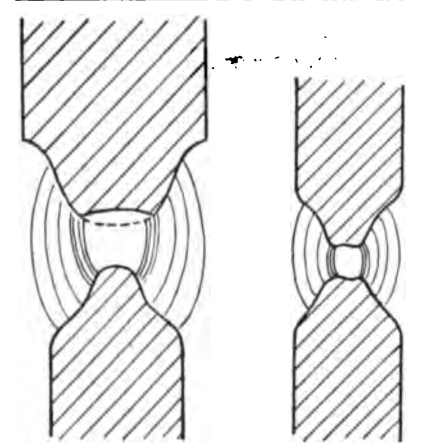
DIE NERNST-LAMPE. Die Metallfadenlampen sind infolgedessen starke Konkurrenten einer vom Physiker Nernst erfundenen elektrischen Lampe geworden, die etwa die gleiche Ökonomie besitzt, aber sonst eine ganze Anzahl unangenehmer Eigenschaften im Betrieb aufweist. Die Nernst-Lampe besteht aus einem Stäbchen aus Magnesium- oder Thoriumoxyd, das erst in glühendem Zustande für den elektrischen Strom leitend wird, dann aber eben eine sehr gute Lichtausbeute bei hoher Temperatur gestattet. Die notwendige Vorwärmung geschieht durch eine Heizspirale, die direkt hinter dem Glühstift angebracht ist. Solange das Stäbchen nicht leitend ist, fließt der ein-

geschaltete Strom durch die Heizspirale. Wird dadurch das Stäbchen leitend, so ist der Strom der Heizspirale auszuschalten, und das geschieht dadurch, daß ein kleiner Elektromagnet, der in den Stromkreis des Stäbchens eingeschaltet ist, alsdann den anderen Stromkreis unterbricht. Daß wir so die Nernst-Lampe nicht momentan einschalten können, ist ein großer Nachteil gegenüber allen anderen elektrischen Lichtquellen. Noch unangenehmer ist es, daß die Heizkörper mit der Zeit ihre Wirksamkeit verlieren und die Zeit des Anzündens dadurch im Betrieb dauernd zunimmt. Ein zweiter Nachteil ist der, daß die Nernst-Lampen gegen Stromschwankungen sehr empfindlich sind. Um solche Stromschwankungen bei veränderlicher Spannung auf ein Mindestmaß zu beschränken, schaltet man Metalldrähte, und zwar Eisendrähte in einer Wasserstoffatmosphäre, in den Stromkreis des Nernst-Stiftes ein. Solche Widerstände besitzen noch in erhöhtem Maße die von Metallfadenlampen gerühmte Eigenschaft, daß sie bei Spannungsschwankungen durch eine entsprechende Änderung ihres Widerstandes nur geringe Stromschwankungen zulassen. Ein dritter und letzter Nachteil ist ferner der, daß nur dann die Nernst-Stifte eine befriedigende Lebensdauer zeigen, wenn sie in einem bestimmten Sinne von Gleichstrom durchflossen werden, bei Wechselstrom funktionieren sie zwar zunächst auch, aber auf Kosten einer längeren Lebensdauer. Es ist daher nicht zu verwundern, daß diese Fabrikation zurückgeht, da die hochkerzigen Metallfadenlampen die sämtlichen gerügten Nachteile nicht zeigen. Für manche Verwendungen, speziell im Laboratorium des Physikers, ist aber die konzentrierte, linienförmige Lichtquelle des Nernst-Stiftes fast unersetzlich.



Abbild. 139. Nernst-Lampe der Allg. Elektr.-Ges., Berlin. Links der herausgenommene Brenner und der in Glas eingeschlossene Vorschaltwiderstand.

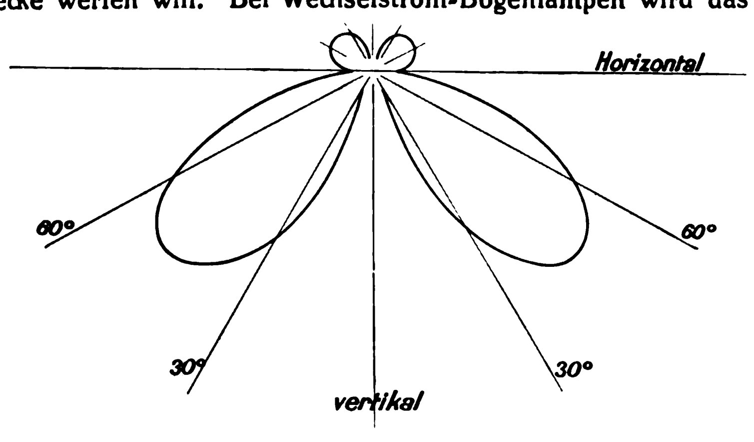
DIE BOGENLAMPEN. Alle bisher genannten Lichtquellen werden in bezug auf ihre Ökonomie geschlagen durch die Bogenlampen, die sich aber nur für alle die Fälle eignen, wo es sich um Erzielung außerordentlicher großer Lichtmengen, bis zu 1000 Kerzenstärken und mehr, handelt. Zwar hat man auch hier versucht, kleine (Liliput-) Bogenlampen für wenige hundert Kerzen maximal zu bauen, doch werden auch diese gerade wieder durch die hochkerzigen Metallfadenlampen vom Markte verdrängt. Die Bogenlampe beruht bekanntlich darauf, daß sich eine leuchtende Lichterscheinung, der Lichtbogen, an jeder Stelle eines stromführenden Kreises sofort bildet, an der man ihn zu unterbrechen sucht. Beim Auseinanderreißen der stromführenden Teile — in der Bogenlampe sind es bekanntlich zwei Kohlen — sucht der elektrische Strom die sich bildende Luftstrecke, die im gewöhnlichen Zustande ein recht guter Isolator ist, zu überbrücken. Wie ein Nernst-Stift wird aber auch die Luft leitend, wenn sie hoch erhitzt ist oder sich entsprechende Dämpfe in ihr befinden. Diese notwendige Wärme entwickelt nun die Elektrizität automatisch an den Übergangsstellen der Kohle zur Luft und in der Luft selbst, wenn man die Kohlen langsam voneinander entfernt. Reicht die zur Verfügung stehende elektrische Energie freilich zur Erzeugung der notwendigen Wärme nicht aus, so erlischt der Lichtbogen, oder er reißt ab, wie man sagt. Die hoch erhitzten Oberflächenteile, durch welche der Strom aus und ein tritt,



Abbild. 140. Kohlen des Gleichstromlichtbogens.

Abbild. 141. Kohlen des Wechselstromlichtbogens.

geraten durch die Lichtbogenbildung in helle Glut, und zwar ist es bei Gleichstrom speziell der Teil, wo der Strom in die Luft austritt, der positive Pol, der die höchste Temperatur, ca. 4000 °, besitzt und das hellste Licht ausstrahlt. Dabei brennt er zu einem Krater aus, während die negative Kohle mit etwa 2400 ° als Spitze dem Krater gegenübersteht. Bei Wechselstrom, wo beide Kohlen fünfzigmal pro Sekunde ihre Rolle vertauschen, ist die Form der Kohlen aus Abbildung 141 zu ersehen. In der Form der Kohlen und der Ausbildung des Kraters bei Gleichstrom ist auch die verschiedene Lichtverteilung bei einer Gleichstrom- und einer Wechselstrom-Bogenlampe begründet (Abbild. 142 u. 143). Bei Gleichstromlampen wird daher die positive Kohle stets oben angeordnet, wenn man nicht bei indirekter Beleuchtung das Licht zunächst ganz gegen eine weiße Decke werfen will. Bei Wechselstrom-Bogenlampen wird das nach oben strahlende Licht durch geeignete Reflektoren, freilich mit Verlust, für den Raum unterhalb nutzbar gemacht. Geeignete Reflektoren spielen auch bei den Gleichstrom-Bogenlampen und den anderen elektrischen Lichtquellen eine wenn auch nicht so wesentliche Rolle. Die Kohlen der Wechselstromlampen brennen naturgemäß gleichmäßig ab, bei

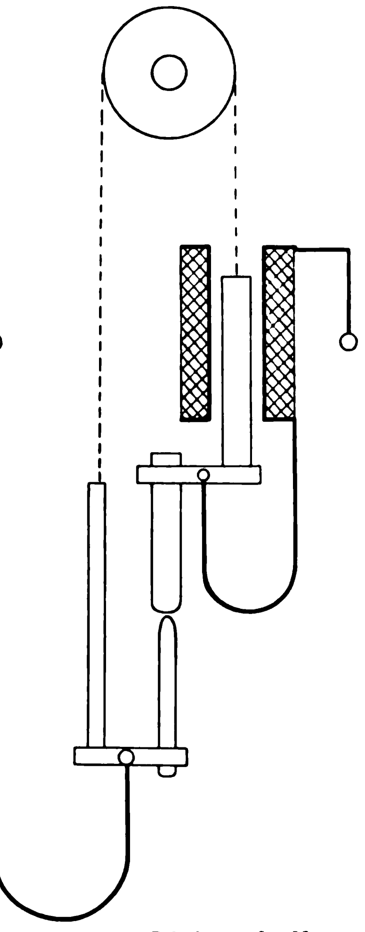


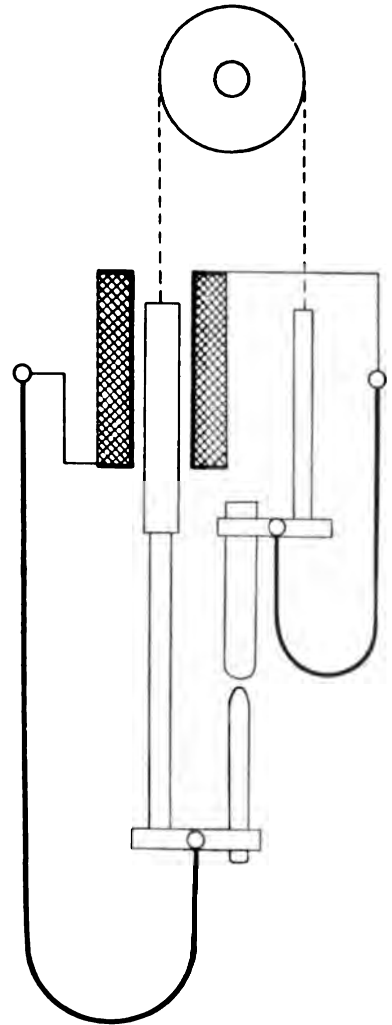
Abbild. 142. Lichtverteilung der Gleichstrombogenlampe ohne Reflektor.

den Gleichstromlampen dagegen die positive etwa doppelt so rasch wie die negative, sie wird daher von der doppelten Stärke bei gleicher Länge hergestellt. Größere Ruhe des Lichtbogens und größere Ökonomie erzielte man, als man die positiven als sogenannte Dochtkohlen ausbildete, d. h. einem inneren weicheren Kohlenkern, dem Docht, einen harten Kohlenmantel gab. Besonders steigert sich die Ökonomie bis auf 0,3 bis 0,4 Watt pro Hefnerkerze in den Flammen-Bogenlampen, in denen dem Docht Metallsalze beigemengt werden. Der Energieverbrauch für normale Gleichstromlampen beträgt etwa 0,8, der für Wechselstromlampen etwa 1,1 Watt pro Kerze. Das Erneuern der Kohlenstifte und das Reinigen

Abbildung 143. Lichtverteilung der Wechselstrom-Bogenlampe ohne Reflektor.

von den Aschenresten ist der Hauptnachteil der Bogenlampen. Infolge des Abbrandes müssen die Kohlen dauernd nachreguliert werden. Bei der Entfernung der Kohlen nimmt die Spannung zwischen ihnen zu und die Stromstärke ab, man kann daher sowohl solche Magnetspulen zur Regulierung benutzen, deren Wirkung vom Strom abhängig ist, indem der ganze Strom hindurchgeht (Abbildung 144), wie solche, die von der Spannung am Bogen beeinflußt werden, indem ihre Enden parallel dem Lichtbogen (in Nebenschluß) gelegt sind. Bei der Hauptstromlampe sucht die Kraftwirkung der Spule die Kohlen zu trennen, bei der Nebenschlußlampe einander zu nähern, im ersten Falle ruhen die Kohlen im stromlosen Zustande aufeinander, im zweiten Falle werden sie beim Einschalten durch die Magnetspule zur Berührung und zur Zündung gebracht. Auf konstante Spannung und konstanten Strom sucht die Differentiallampe einzuregulieren, bei der eine Magnetspule die Kohlen einander zu nähern strebt mit einer Kraft proportional der Spannung, während die zweite Spule, die vom ganzen Strom des Lichtbogens durchflossen wird, die Kohlen voneinander zu entfernen strebt. Bei Wechselstrom-Bogenlampen werden die Magnetspulen mit Eisenkern häufig durch ein „Ferraris-System" ersetzt. In gewöhnlicher Luft brennen Bogenlampen mit ca. 40 Volt Spannung, so daß man 2 bei 110 Volt und bis 5 bei 220 Volt hintereinanderschalten kann. Jederzeit ist aber noch ein Vorschaltwiderstand im Kreise erforderlich, denn solange sich die Kohlen berühren, ist zwischen ihnen überhaupt kein merklicher Spannungsabfall vorhanden, es würden also dann zur Zündung ganz gewaltige Stromstärken durch die Lampen hindurchgehen. Durch Änderung des Vorschaltwiderstandes kann man auch die Bogenlampen auf die richtige Stromstärke einregulieren; dazu kommt ein weiterer regulierbarer Teil, Gewichte, Federn oder dergleichen in der Lampe selbst, die den Kräften der


Abbildung 144. Schaltung der Hauptstrom-Bogenlampe.


Abbildung 145. Schaltung der Nebenschluß-Bogenlampe.

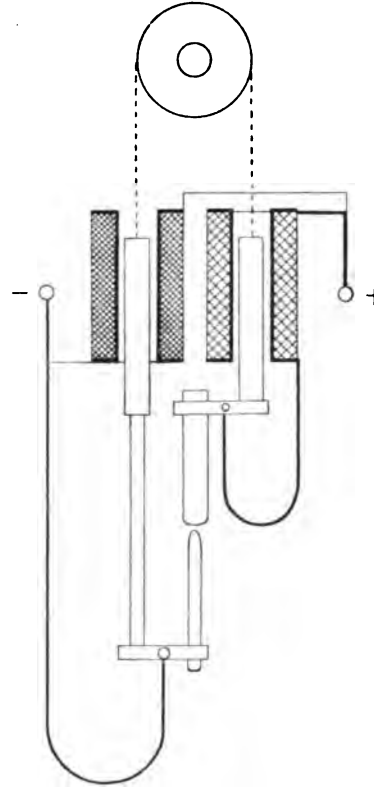


Abbildung 146. Schaltung der Differential-Bogenlampe.

Magnetspulen das Gleichgewicht halten müssen. Zwei Teile zur Regulierung sind ja auch unbedingt erforderlich, wenn wir zwei Größen, die Spannung und den Strom, einregulieren wollen. Einige abweichende Eigenschaften zeigen die Bogenlampen, wenn man sie in kleineren Glasgefäßen eingeschlossen unter Druck brennen läßt. Einmal verzehrt sich der Sauerstoff im abgeschlossenen Raume, und der Abbrand der Kohlen wird vermieden, soweit er auf Oxydation zurückzuführen ist, und während die Kohlen der normalen Lampen nach 8 bis 10 Stunden erneuert werden müssen, erhält man bei diesen Lampen mit eingeschlossenem Lichtbogen oder Dauerbrandlampen 100 Brennstunden und mehr. Im eingeschlossenen Raume kann man ohne die Gefahr des Abreißens den Lichtbogen ferner länger machen, muß dann aber eine höhere Spannung anlegen, etwa 80 Volt, so daß man durch sie den Vorteil erhält, in einem Netz von 110 Volt eine einzige Bogenlampe mit einem verhältnismäßig geringen Vorschaltwiderstand brennen zu lassen, man setzt $\frac{80}{110}$ der aufgewendeten Energie in der Bogenlampe um, während man bei einer einzigen normalen Lampe nur $\frac{40}{110}$ in der Lampe ausnutzen würde. Der Nachteil der Dauerbrandlampen ist aber der, daß sie ganz bedeutend unruhiger brennen, so daß sie für viele Zwecke unbrauchbar sind. Man hat sich deshalb neuerdings entschlossen, in der sogenannten Sparbrandlampe die Vorteile der normalen und der Dauerbrandlampe einigermaßen zu vereinigen. Man geht in den Forderungen an die Brenndauer bei diesen Lampen nicht so weit, begnügt sich etwa mit 30—40 Brennstunden, erhält aber durch Einschließen des Bogens ein helles weißes Licht bei 70—80 Volt Spannung, so daß auch diese Lampe bei einer Netzspannung von 110 Volt einzeln geschaltet werden kann. Dabei wird besonders durch die Wahl dünner Kohlen ein viel ruhigeres Brennen erreicht als bei den Dauerbrandlampen, wenn es auch den höchsten Anforderungen an eine gleichmäßige Beleuchtung noch nicht genügt. Vielfach macht sich auch das Bestreben geltend, Lampen ohne Regelwerk herzustellen. Die Herstellung solcher Lampen bedeutet eine Ersparnis an Anschaffungskosten, man hat den Vorteil, sie in gleicher Weise für Gleich- wie Wechselstrom durchbilden und sie in größerer Anzahl hintereinanderschalten zu können, was besonders bei Wechselstromkreisen höherer Spannung von Vorteil bei der Straßenbeleuchtung sein kann. Eine solche Lösung, die Conta-

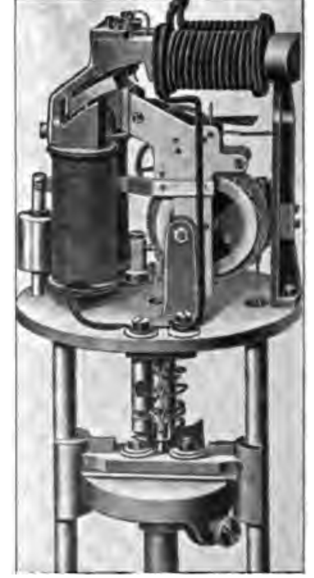


Abbildung 147. Wirkliche Ausführung des Regelwerks einer Differential-Bogenlampe durch Körting und Mathiesen, Leipzig.



Abb. 148. Lampe mit eingeschlossenemBogenvon Körting & Mathiesen, Leipzig.

Lampe der Regina-Bogenlampen-Fabrik, ist in Abbildung 149 und 150 dargestellt. Das scheinbare Regelwerk ist nichts weiter als eine Magnetspule, welche die Zündung besorgt. Die in Abbildung 149 zu ersehende Spule ist nach erfolgter Zündung für das Verhalten der Lampe ohne Einfluß. Die Kohlen sinken vielmehr durch ihr eigenes Gewicht nach, bis die negative Kohle mit ihrer Spitze einen Kloben berührt, der dann eine Bremsung der Bewegung einleitet. Der Vorteil bei der Anordnung der Kohlen ist der, daß der Krater fast direkt nach unten strahlt und sich also das Licht günstiger als bei den normalen Gleichstromlampen verteilt. Schwierig ist dagegen, ein stetes gleichmäßiges Abbrennen beider Kohlen zu erreichen, ebenso eine stets sichere Zündung, da die beiden Kohlen, wie aus der Abbildung 150 hervorgeht, seitlich gegeneinander gedrückt werden, während sie bei den normalen Lampen zentrisch gegeneinander gestoßen werden.

Durch längeren Gebrauch beschlugen meist die großen Glasglocken, die fast alle Bogenlampen zur Milderung der Grelle des Lichts erhalten, der Vorteil aller neueren Lampen ist der, daß durch geschickte Ventilation der Beschlag auf ein Mindestmaß zurückgeführt wird.

Abbild. 150. Ansicht der Conta-Lampe (vgl. Abbild. 149) von unten. Kohlen, Kloben und Bremsvorrichtung sichtbar.

DIE QUECKSILBER-LAMPE. Schon die sehr ökonomische Flammen-Bogenlampe besitzt keine reine Temperaturstrahlung mehr. Zum Teil sendet freilich auch in ihr der sehr hoch erhitzte Krater Licht aus, zum Teil sind es aber auch die leuchtenden Dämpfe der Metallsalze im elektrischen Feld, d. h. es ist eine Lumineszenzerscheinung, die hier zur Geltung kommt. Auf einer ähnlichen Stufe steht die Quecksilber-Bogenlampe, zuerst von Arons angegeben, später von Cooper-Hewitt weiter ausgebildet, bei der ein Lichtbogen zwischen Quecksilber-Elektroden im Vakuum übergeht. Das Gefäß besteht ent-

Abbildung 149. Conta-Lampe der Regina-Bogenlampen-Fabrik, Köln. Rechts oben die Zündspule, links oben der Vorschaltwiderstand.

weder aus Glas oder aus Quarz. Die Lampe hat eine günstige Ökonomie, sendet aber hauptsächlich grüne bis violette Strahlen aus, so daß alle Gegenstände ihre normalen Farben verlieren. Ihr weiterer Nachteil ist, daß sie besonders gezündet werden muß, indem man das Quecksilber etwa durch Kippen miteinander in Berührung bringt und durch Zurückdrehen in die alte Lage dann den Lichtbogen entstehen läßt.



Abbildung 151. Moderne Armatur einer Bogenlampe von Körting & Mathiesen, Leipzig.

MOORE-LICHT. Neuerdings hat der Amerikaner Moore versucht, die reine Lumineszenzstrahlung, wie sie jeder von der Geisler-Röhre von der Schule her kennt, technisch auszubilden, indem er Röhren bis zu 8 m Länge und mehr wie jene zum Leuchten bringt. Die Schwierigkeit bei solchen Röhren war die, daß sie bei längerer Benutzung ihre Leuchtkraft vollständig ändern, solange sie wie gewöhnliche Geislersche Röhren fest zugeschmolzen waren. Moore gelang die Überwindung dieser Schwierigkeit. Wieweit dieses Licht den Anforderungen der Praxis dauernd genügen wird, muß erst die Zukunft lehren.

Nach den außerordentlichen Fortschritten, die die Beleuchtungstechnik gerade wieder in den letzten Jahren gemacht hat, wird man mit Sicherheit annehmen können, daß wir uns auch auf diesem Gebiete nicht am Ende einer Entwicklung befinden; ist doch weder bei der reinen Temperaturstrahlung auch nur annähernd das zu erstrebende Ziel erreicht, der Sonnentemperatur nahezukommen, und befinden sich doch auf der anderen Seite unsere Kenntnisse über die genauen Einzelheiten der Ökonomie der Lumineszenzstrahlung und deren technische Verwendbarkeit noch in den Kinderschuhen.

Falls es sich darum handelt, chemisch wirksame Lichtquellen zu benutzen, greift man heute hauptsächlich zu den Bogenlampen, besonders denjenigen mit eingeschlossenem Lichtbogen und den Quecksilberlampen, die bei weitem die meisten chemisch wirksamen (ultravioletten) Strahlen aussenden.

4. REGELUNG UND VERTEILUNG DER ELEKTRISCHEN ENERGIE

ALLGEMEINES. Vor- und Nachteile der verschiedenen Stromarten. Die Möglichkeit, elektrische Energie in Licht einerseits, in mechanische Arbeit anderseits umzusetzen, ist es also, die die elektrischen Anlagen über den ganzen bewohnten Erdball hin, zuerst in den Städten und in Deutschland nun auch schon in beträchtlichem Maße auf dem Lande verbreitet hat. Unter den mechanischen Problemen ist es das des Verkehrs, das an erster Stelle genannt zu werden verdient. Erst neuerdings tritt die Chemie mit Anforderungen an die Elektrotechnik heran, aber auch gleich in recht großem Maßstabe. Reine Lichtzentralen verschwinden immer mehr und mehr, bei den meisten Kraft-Licht-Zentralen nehmen die für mechanische Zwecke abgegebenen Kilowattstunden prozentual stärker zu als diejenigen für Beleuchtung. Die Kraft-Licht-Zentralen teilt man dann wieder in solche für starkbevölkerte Gegenden (Städte und Industriebezirke) und Überlandzentralen vorwiegend landwirtschaftlicher Bestimmung ein. Wenn sich

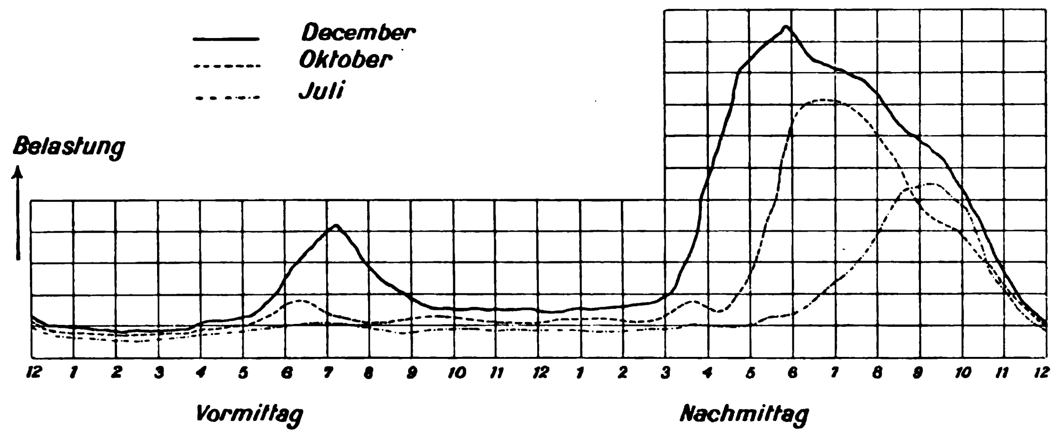


Abbildung 152. Tagesbelastungskurven für verschiedene Jahreszeiten.

auch konstruktiv die Maschinen in diesen Zentralen, die Apparate und die Stromarten nicht zu unterscheiden brauchen, so werden in wirtschaftlicher Beziehung und daher auch in bezug auf ihre Organisation sehr verschiedene Anforderungen an sie gestellt. Der Unterschied der verschiedenen Zentralen kommt hauptsächlich in ihrer Belastungskurve zum Ausdruck oder in der Art, wie die Belastung einmal den Tag über, dann zu den verschiedenen Jahreszeiten schwankt. Unter der täglichen „Belastungskurve" versteht man die Linie, welche die Belastung in Abhängigkeit von den Stunden des Tages darstellt. In Abbildung 152 sind Tagesbelastungskurven einer Lichtzentrale für verschiedene Monate des Jahres übereinander gezeichnet. Die mittlere Leistung kann dann wieder mit den Jahreszeiten stark schwanken, und ihre graphische Darstellung heißt die Belastungskurve des Jahres (vgl. Abbildung 153). Weder bei den Bahnzentralen noch bei Zentralen für die chemische Industrie treten im allgemeinen starke Tages- oder Jahresschwankungen auf. Da sowohl die Verwertung der Elektrizität zu chemischen Zwecken wie für den Betrieb elektrischer Bahnen noch an einer anderen Stelle dieses Werkes genauer behandelt wird, so soll im folgenden besonders auf die Licht- und Kraftzentralen Rücksicht genommen werden. Wenn wir unter diesen hauptsächlich Gleich- und Drehstromzentralen finden, dagegen nur einige ältere Wechselstromzentralen, so liegt die Begründung darin, daß es für einfachen Wechselstrom bisher keinen normalen leistungsfähigen Motor gibt, der einerseits mit dem Nebenschluß-Gleichstrommotor, andererseits mit dem Asynchron-Drehstrommotor konkurrieren könnte (vgl. S. 300). Falls die Energie auf nicht zu große Entfernung zu übertragen ist, wird stets Gleichstrom dem Drehstrom vorgezogen, da die Verwendung von Akku-

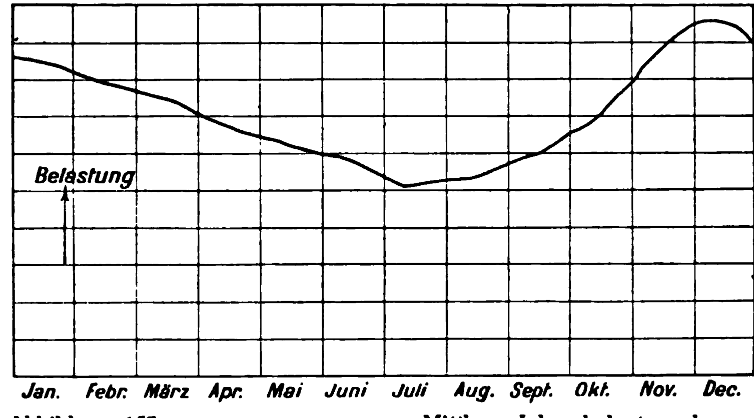


Abbildung 153. Mittlere Jahresbelastungskurve.

mulatorenbatterien außerordentliche wirtschaftliche Vorteile mit sich bringt, und eine Aufspeicherung in Akkumulatoren ist ja bekanntlich nur bei Gleichstrom möglich. Handelt es sich dagegen darum, Energie auf weite Strecken zu entsenden, so finden wir stets Drehstromanlagen wie z. B. bei allen neueren Überlandzentralen (von Bahnzentralen sehen wir ja eben ab). Will sich der Laie die Möglichkeit der Akkumulierung der Energie bei Gleichstrom und die Möglichkeit der Transformierung der Spannung bei Wechselstrom an einem mechanischen Analogon oder Gleichnis klarmachen, so

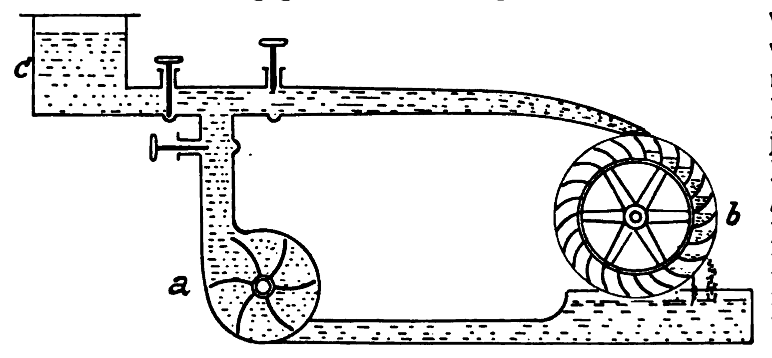


Abb. 154. Mechanisches Gleichnis zu einer Gleichstrom-Kraftübertragung.

betrachte er einmal in Abbildung 154 die dem Gleichstrombetrieb ähnlichen Verhältnisse bei einem Wasserkreislauf mit stets gleichfließendem Wasser, der aus einer Zentrifugalpumpe a und einer Wasserturbine oder einem Wasserrade b besteht. Wir können in diesem Falle ein Hochreservoir c anbringen, in das unter Zuhilfenahme geeigneter Schieber bei geringem Kraftverbrauch Wasser durch die Zentrifugalpumpe gehoben wird und das zu anderen Zeiten Energie abgeben kann, die Zentrifugalpumpe vielleicht dabei unterstützend. Die Unmöglichkeit, Energie bei Wechselstrom aufzuspeichern, ersieht der Laie aus dem mechanischen Analogon in Abbildung 155. Durch Auf- und Abbewegen des Kolbens a kann man die Wassersäule ähnlich dem elektrischen Wechselstrom in hin und her gehende Bewegung versetzen und so die Energie auf den Kolben b zur Arbeitsleistung übertragen. Nehmen wir nun an, daß die Verluste in der Leitung zwischen a und b um so größer sind, je größer bei gegebenem Leitungsquerschnitt die darin bewegte Wassermenge ist, was ja genau so für den elektrischen Strom zutrifft, so können wir uns auch ohne weiteres die Möglichkeit und die Vorzüge der Spannungstransformierung bei Wechselstrom an unserem mechanischen Beispiel klar machen. Schalten wir in die Wasserleitung Druckkolben c nach Abbildung 156 ein, so weiß wohl ein jeder, daß bei einer Verschiebung der Druckkolben der kleinere von ihnen nur eine bedeutend kleinere Wassermenge, und zwar im Verhältnis ihrer Oberflächen in Bewegung setzt. Dafür übt er aber einen um so höheren Druck aus, und zwar im umgekehrten Verhältnis der Oberflächen, so daß doch dieselbe Energie auf die Wassersäule cc und weiter auf den Kolben b übertragen werden kann. Die Verluste in den Leitungen werden bei dem höheren Druck entsprechend der geringeren Flüssigkeitsmenge, die in Bewegung gesetzt wird, vermindert. Wir haben es also mit genau denselben Verhältnissen zu tun wie bei der Transformierung des Wechselstroms. Der Druck entspricht

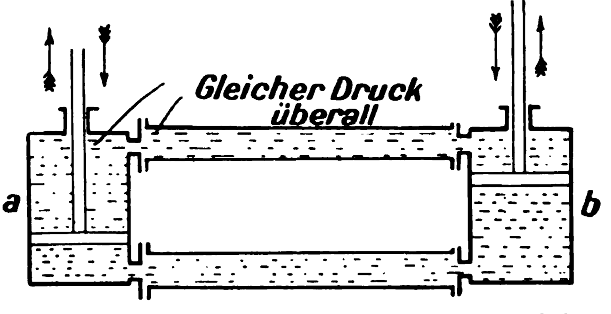


Abbildung 155. Mechanisches Gleichnis zu einer einfachen Wechselstrom-Kraftübertragung (ohne Transformatoren).

der Spannung, die pro Sekunde in Bewegung gesetzte Wassermenge dem elektrischen Strom, die Kolben c den Transformatoren.

Neben dem Vorteil der Akkumulierung der Energie bei Gleichstrom, der Transformierung der Spannung bei Drehstrom spielen alle übrigen Gesichtspunkte für die Wahl des Stromsystems eine untergeordnete Rolle. Gewiß, die Gleichstrom-Bogenlampe hat eine bessere Ökonomie als die Wechselstromlampe, die Nernst-Lampe ist nur für Gleichstrom brauchbar, die Tourenzahl ist besonders leicht bei Gleichstrommotoren zu regulieren. In diesen Punkten scheint also der Gleichstrom etwas im Vorteil. Aber die Glühlampen sind für beide Stromarten gleichwertig, die Nernst-Lampe kann heute durch Metallfadenlampen ersetzt werden; Drehstrom kann sogar unter geringen Verlusten mittels Transformatoren niedervoltigen Metallfadenlampen von langer Lebensdauer in Netzen von höherer Spannung zugeführt werden. Für normale mechanische Zwecke ist der Drehstrommotor sogar dem Gleichstrommotor vorzuziehen, da die Beaufsichtigung des Kommutators wegfällt, und sogar für variable Tourenzahlen ist neuerdings der Drehstrom-Kommutatormotor geschaffen worden.

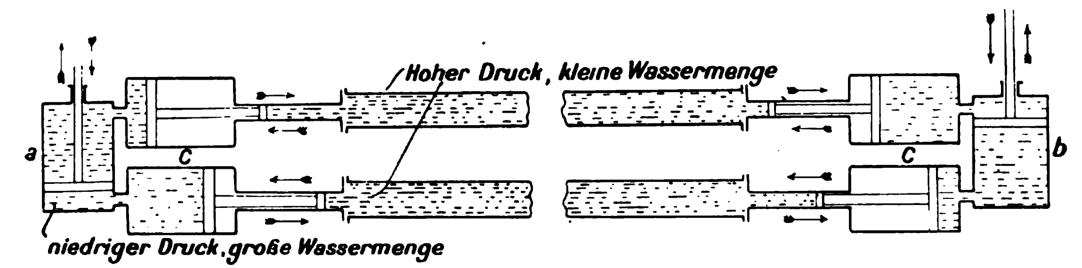


Abbildung 156. Mechanisches Gleichnis einer Wechselstrom-Kraftübertragung mit Transformation der Spannung.

Aus allen diesen Gründen ist die Wahl des Systems nicht schwer, wenn es sich entweder um weite dünnbevölkerte oder kleinere dichtbevölkerte Bezirke handelt, die mit elektrischer Energie zu versehen sind: dort Drehstrom, hier Gleichstrom.

Aber noch die Kombination beider Systeme ist möglich: Erzeugung der Energie in Drehstromzentralen, Übertragung mit Hochspannung und Umformung in Gleichstrom in Unterstationen mit Aufspeicherung der Energie in Akkumulatorenbatterien. Während in reinen Industriebezirken mit einer sehr gleichmäßigen Belastung durch Motoren der reine Drehstrom häufig bevorzugt wird, zeigen viele Städte, an der Spitze Berlin, die Entwicklung zum kombinierten System: die alten Gleichstromzentralen im Inneren der Stadt auf teurem Grund und Boden verschwinden oder werden zu Unterstationen mit Umformern und Akkumulatorenbatterien umgebaut, und neue Drehstromzentralen für Hochspannung werden an der Peripherie an solchen Stellen gebaut, wo Wasser und Kohlen leicht und billig beschafft werden können. Die dünnbevölkerten Außenbezirke werden eventuell direkt mit Drehstrom versorgt. Amerika war Europa in der Ausbildung dieses Systems unter Bevorzugung der Einankerumformer vorangegangen, während in Europa häufig zunächst verschiedene Gleichstromzentralen angelegt wurden, welche die einzelnen Bezirke versorgten; und als man später zu dem kombinierten System überging, wurden zunächst Maschinensätze, bestehend aus Drehstrommotor und Gleichstromdynamo, vielfach statt der Einankerumformer verwandt, da deren Spannung in ihrer einfachen Gestalt ja nicht regulierbar war.

Das kombinierte System wird schließlich auch dann angezeigt sein, wenn die Energie (z. B. von Hochofengasen) unabhängig von dem Konsum umgesetzt werden

muß und eine andere Aufspeicherung der Energie als in Akkumulatoren, etwa in Wasserhochbehältern, ausgeschlossen ist.

Die Größe der Maschinensätze in einer Zentrale muß so bemessen werden, daß die höchste Belastungsspitze am Tage der stärksten Jahresbeanspruchung (vgl. Abbildung 152) unter Zuhilfenahme der Akkumulatoren bewältigt werden kann und außerdem noch Reserven für den Fall des Niederbruchs einer Maschine vorhanden sind. Das zunächst noch willkürliche Verhältnis zwischen der Maschinen- und Akkumulatorenleistung wird so bestimmt, daß die Akkumulatoren außerdem die geringen Belastungen etwa von Mitternacht bis zum frühen Morgen allein übernehmen können, während sie dann am Vormittag wieder neu aufgeladen werden. Da der Wirkungsgrad der Batterien etwa 75 % bei kurzzeitiger und auch nur bis 82 % bei achtstündiger Entladung beträgt, so ist es das Bestreben aller Zentralen, eine Vergrößerung der Akkumulatorenbatterien zu vermeiden, d. h. eine möglichst gleichmäßige Belastung zu erzielen, was nur durch Entwicklung des Kraftbedarfs möglich ist, wie ja ohne weiteres aus den Belastungskurven hervorgeht. Daher kann für Kraftbedarf auch ein bedeutend niedrigerer Tarif gewährt werden, da die Maschinen wegen des Lichtkonsums doch an und für sich schon notwendig sind, das Werk also ein Geschäft macht, sobald Brenn-, Schmier- und Putzmaterial und die Kosten, die durch größere Abnutzung entstehen, durch den Tarif gedeckt werden, während Verzinsung, normale Amortisation, Wartungs- und Generalunkosten und eben auch die Anschaffungs- und Unterhaltungskosten der Akkumulatorenbatterien und deren Verluste nicht in Frage kommen. Für ein Drehstromwerk, das für die höchste Belastung volle Maschinenkraft und dann noch Reserven zur Verfügung halten muß, und bei dem wenigstens eine Maschine jederzeit in Betrieb zu halten ist, ist die Heranziehung von Konsumenten mit möglichst gleichmäßiger Entnahme natürlich erst recht eine Lebensfrage. Anderseits ist bei diesen Zentralen das Bestreben vorhanden, die zinsenfressenden Reserven dadurch herabzudrücken, daß benachbarte Werke durch Hochspannungsleitungen für gelegentliche Unterstützung miteinander verbunden werden. In sehr großem Umfange ist so z. B. das Rheinisch-Westfälische Elektrizitätswerk in Essen durch Elektrizitäts-Lieferungsverträge mit Gruben usw. für den Notfall gedeckt. Das demselben Konzern angehörige Elektrizitätswerk Berggeist bei Brühl ist mit dem Elektrizitätswerk in Solingen parallel schaltbar, und als tatsächlich vor einer Reihe von Jahren das Solinger Werk durch Feuer vernichtet wurde, konnte die elektrische Versorgung von Brühl aus auf eine Entfernung von etwa 50 km Luftlinie ohne weiteres aufrechterhalten werden. Neben der absoluten Größe der gesamten Maschinensätze und der Akkumulatorenbatterien ist die zweite wichtige Frage die richtige Unterteilung der Maschinen. Bekanntlich je größer die Maschine, desto größer ihr Wirkungsgrad bei normaler Belastung, je geringer aber die Belastung ein und derselben Maschine, desto kleiner, entsprechend den Kurven der Abbildung 89. Die Kunst des projektierenden Ingenieurs besteht also darin, die Maschinensätze so zu dimensionieren, daß zu den verschiedenen Tages- und Jahreszeiten trotz der schwankenden Belastung eine möglichst große Maschine möglichst vollständig belastet werden kann.

Die Höhe der zu wählenden Spannung. Bei Gleichstromzentralen ist die Höhe der Spannung stets gegeben durch die in Massenfabrikation hergestellten Glühlampen. Man hat sich bekanntlich auf 110 und 220 Volt geeinigt; geringere Spannungen, z. B. von 65 Volt, sind zum Teil noch auf Schiffen in Gebrauch, doch geht man auch dort zu 110 Volt über. Als zunächst die Metallfadenlampen nur für 110 Volt hergestellt werden konnten, hatte es den Anschein, als ob man zu dieser Spannung

bei Neuanlagen zurückkehren würde. Nachdem aber auch Metallfadenlampen von genügender mechanischer Festigkeit für 220 Volt hergestellt werden, wenn sie auch nicht die gleiche Lebensdauer bei gleicher Kerzenstärke besitzen, so wird die Wahl zwischen 110 und 220 Volt auch weiterhin nur von der zu überbrückenden Entfernung abhängen, während eine niedrigere Spannung als 110 Volt heute keinen Vorteil mehr bietet. Sobald die Anlage einen nennenswerten Umfang besitzt, wird man zum Dreileitersystem übergehen, und zwar 2×110 Volt bevorzugen, wenn der Lichtkonsum vorherrscht und auch Lampen mit niedrigeren Kerzenstärken verlangt werden. Metallfadenlampen mit 110 Volt besitzen eben eine befriedigende Lebensdauer, wenn sie wenigstens 25 Normalkerzen besitzen, während man bei 220 Volt zu Lampen von 32 oder besser noch 50 Kerzenstärken greifen muß, will man eine Lebensdauer von 1000 Brennstunden und mehr erreichen. Zu 2×220 Volt wird man übergehen, wenn ein Stadtgebiet von etwa 2 km Radius zu versorgen ist oder auch Motorenbelastung vorherrscht. Diese werden stets für die ganze Außenspannung, also 220 oder 440 Volt, vorgesehen, mit Ausnahme der ganz kleinen Typen unter 1 P.S. Für Gleichstrom-Bahnzentralen finden wir 550—1200 Volt. Bei Wechselstrom oder Drehstrom finden wir in der Niederspannungsleitung für Lichtbetrieb dieselben Spannungen wie bei Gleichstrom, bei Hochspannung scheint bisher die gewählte Spannung von Fall zu Fall zu wechseln. Je höher die Spannung und um so kleiner die Stromstärke, desto geringer der Verlust in der Leitung infolge ihres Widerstandes. Andere Verluste, z. B. derjenige der Elektrizitätsmengen, die durch Isolationsfehler zur Erde abfließen, steigen mit der Spannung. Hierzu gehören ferner die Verluste durch direkte Elektrizitätszerstreuung in die Luft bei sehr hohen Spannungen und diejenigen in Kabeln durch „dielektrische Hysterese": Unter dem Einfluß hoher Spannungen treten in den Isolationsmaterialien elektrische Kräfte auf, die eine Umlagerung der kleinsten Teile, der Moleküle, hervorrufen, wie die magnetischen Kräfte die Eisenmoleküle richten (vgl. S. 298). Auch in den Isolationsmaterialien tritt infolge dieser Kräfte bei Wechselstrom eine fortdauernde Umlagerung und molekulare Reibung auf, die in Anlehnung an die entsprechenden Vorgänge im Eisen die dielektrische Hysterese genannt wird. Nach den Vorschriften des Verbandes deutscher Elektrotechniker ist eine Hochspannungsanlage jede, in der ein Leiter mehr als 250 Volt gegen Erde besitzt. (Eine Gleichstrom-Dreileiteranlage mit 440 Volt zwischen den Außenleitern, aber mit 220 Volt gegen den geerdeten Nulleiter ist also noch eine Niederspannungsanlage.) Die obengenannten Verluste treten aber erst in Hochspannungsanlagen etwa von 10000 Volt an in merklichem Maße auf. Neben den Verlusten sind für die Wahl der Spannung folgende Gesichtspunkte zu berücksichtigen: Mit der Höhe der Spannung steigen die Kosten, die bei gleicher Leistung für die Transformatoren und Schaltapparate aufzuwenden sind, es steigt der Raumbedarf in der Zentrale, es steigen schließlich die Kosten für die Isolatoren und für das Leitungsgestänge, da die Isolatoren nicht nur größer sind, sondern auch weiter voneinander montiert werden müssen. Eine Grenze für die Höhe der Spannung setzt in manchen Fällen schließlich auch der Umstand, daß aus Festigkeitsrücksichten zu dünne Drähte überhaupt nicht bei Hochspannung verwandt werden dürfen, also trotz einer Spannungssteigerung nicht mehr an Kupfer gespart werden kann. Nach den Vorschriften des Verbandes deutscher Elektrotechniker ist ein kleinerer Querschnitt als 10 qmm für Hochspannung überhaupt nicht zulässig.

Der projektierende Ingenieur wird daher für die zu übertragende Energiemenge, sobald er einmal den zulässigen Verlust in der Leitung festgelegt hat, die wirtschaft-

lich vorteilhafteste Spannung unter Berücksichtigung aller dieser Momente bestimmen. Tatsächlich wurden auch bis vor kurzem Hochspannungsnetze mit allen möglichen Spannungen betrieben. Wie nun für Niederspannung die Rücksicht auf die Massenfabrikation der Glühlampen und Motoren zur Vereinbarung zweier normaler Spannungen führte, so drängte auch die Rücksicht auf eine durchzuführende Massenfabrikation der Schalter, Isolatoren und schließlich auch der Transformatoren zur Festlegung einer bestimmten Hochspannungsskala. Erst in letzterer Zeit aber, seitdem die Anzahl der Hochspannungszentralen rapide wächst, hat sich der Verband deutscher Elektrotechniker veranlaßt gesehen, folgende Spannungen als normale vorzuschlagen: 750, 1500, 3000, 6000, 12000, 24000, 35000, 50000, 80000, 110000, 150000 und 200000 Volt, damit die bisher angewandten Spannungen schon überschreitend. Wird sich die Fabrikation bei der Herstellung der Ölschalter, Isolatoren usw. tatsächlich allgemein auf diese Werte festlegen, so wird natürlich auch der projektierende Ingenieur keine Zwischenspannungen mehr wählen, sondern die Durchschlagsfestigkeit der listenmäßigen Materialien auch vollständig ausnutzen. Die Schalter bei Hochspannung unterscheiden sich freilich nicht allein nach der Spannung und der normalen Stromstärke, bei der sie das Netz eventuell abschalten sollen; sie wirken, wie wir in einem der nächsten Abschnitte sehen werden, gleichzeitig als Unterbrecher bei Überlastungen und Kurzschlüssen, und die Energie, die sie hierbei ohne schädliche Lichtbogenbildung unterbrechen müssen, ist auch für ihre Größe maßgebend.

DIE LICHT-KRAFT-ZENTRALEN. Generelle Schalteinrichtungen in elektrischen Zentralen. Wer in Amerika alte Edison-Zentralen betrat, und solche waren teilweise im Anfang dieses Jahrhunderts noch in Betrieb, dem bot sich etwa folgendes Bild dar: Rings an den Wänden entlang liefen schwere Kupferbarren, die sogenannten Sammelschienen, mit denen durch einfache Schalter die Gleichstrommaschinen verbunden werden konnten. An jeder Maschine befand sich der dazugehörige Widerstand, Strom- und Spannungsmesser; der Maschinenwärter mußte an jeder einzelnen Maschine die notwendige Regulierung und Schaltung vornehmen. Sehr bald aber stellte sich die Notwendigkeit heraus, alle Apparate und Schalter auf einer einzigen Schalttafel zu zentralisieren. Die Sammelschienen verlaufen nur noch hinter der Tafel, von jeder einzelnen Maschine werden besondere Leitungen bis zur Schalttafel gezogen, meist als Kabel unter dem Flur des Maschinenhauses; von den Sammelschienen gehen wieder die Verteilungsleitungen in die Keller. Die Zentralisierung ersparte Arbeitskräfte und machte überhaupt erst die Beherrschung großer Energiemengen möglich. Bei sehr großen Stromstärken aber, wie sie z. B. in den Berliner Elektrizitätswerken vorkommen, oder bei sehr hohen Spannungen ist es nicht erwünscht, die Leitungen auf dem Umweg über die Schalttafel zu führen; in einem Falle muß man eine unnötige Menge Kupfer installieren, im anderen Falle bringt die hohe Spannung Gefahr für die Bedienungsmannschaft mit sich. Wieder laufen darum z. B. in den neueren Zentralen Berlins, deren Maschinen Ströme bis zu mehreren Tausend Ampere liefern schwere Kupferbarren in der Nähe der Maschinen vorbei — meist nur in dem Keller unter ihnen —, und die Schalter sitzen wiederum in ihrer unmittelbaren Nähe; nur werden diese jetzt nicht mehr an Ort und Stelle von dem Wärter, sondern mittels Relais, Magnetspulen usw. mit schwachen Strömen von einem Schaltpult aus betätigt. Bei diesem Fernschaltsystem ist also die Zentralisation des Schaltungsvorganges mit der Dezentralisation der Leitungsführung vereinigt. Bei mittleren Spannungen und kleineren Leistungen kann das System aber nicht angewandt werden, weil die Fernschalter, die Relais usw. bedeutend teurer sind als direkte einfache Handschalter. Die

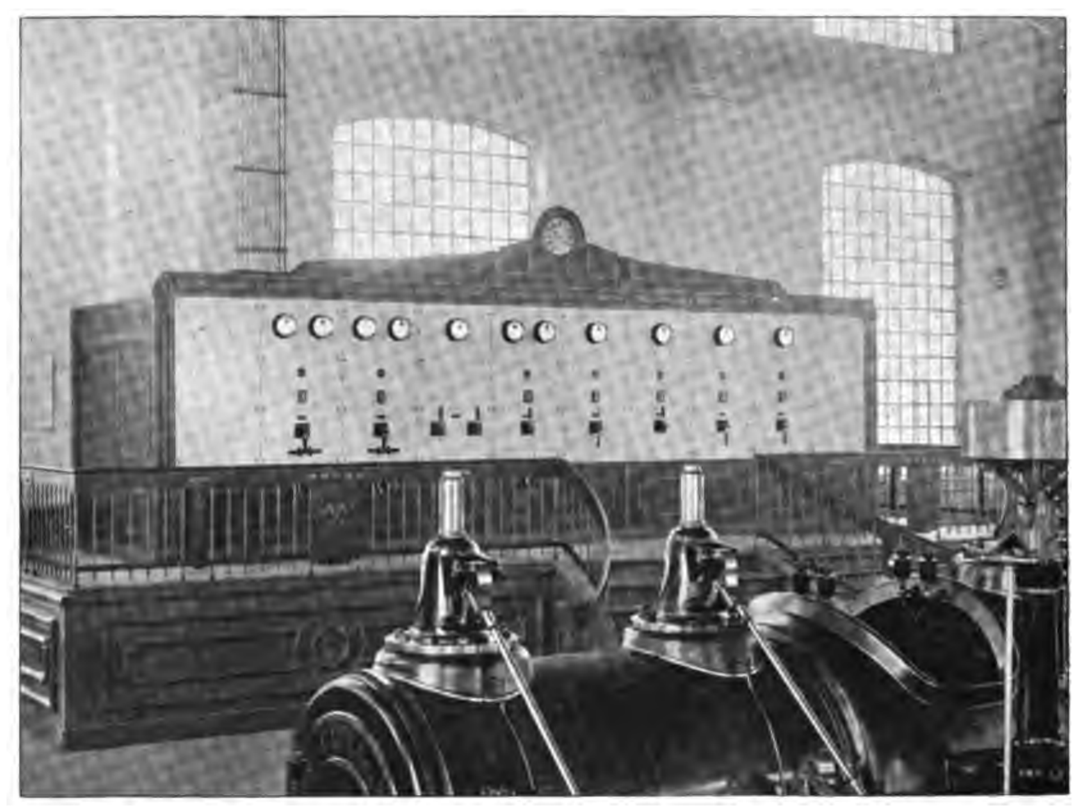


Abbildung 157. Einfache Schalttafel mit Einzelfeldern des Stahlwerks St. Ingbert, ausgeführt von Voigt & Haeffner A.-G., Frankfurt a. M.

Übersichtlichkeit der Leitungsführung und die Sicherheit gegen Kurzschlüsse wird im allgemeinen durch die indirekte Schaltung erhöht. Die Sicherheit, auch speziell des Betriebspersonals, ist aber bei Hochspannungsanlagen von ausschlaggebender Bedeutung und daher auch bei solchen mittlerer Leistung das Fernschaltsystem häufig vertreten. Alle Hochspannungsteile dürfen überhaupt nur besonders geschultem Personal zugängig sein und auch für dieses soll die Möglichkeit, Leitungen verschiedener Spannungen zu berühren, möglichst beschränkt werden. Auch hier ist es aber nicht angebracht, unter großen pekuniären Opfern zu weit zu gehen, da die größere Sicherheit das Betriebspersonal sorglos macht, so daß es den gelegentlich doch nicht zu vermeidenden Gefahren um so eher zum Opfer fällt.

Konstruktive Unterschiede der Schalteinrichtungen. Die Zentralisation aller Apparate auf Schalttafeln fiel in Deutschland in eine Zeit der Anwendung mißverstandener ästhetischer Prinzipien im Maschinenbau. So sah man noch Mitte der neunziger Jahre in Deutschland Schalttafeln, deren Umrahmung in gotischen oder sonstigen Stilarten gehalten waren, und auf denen die Instrumente und Apparate besonders mit Rücksicht auf ein gefälliges Aussehen angeordnet wurden. Dagegen betonte der praktische Sinn der Amerikaner schon frühzeitig die Forderungen:

1. Übersichtlichkeit der elektrischen Schaltung schon durch die Anordnung der Apparate.
2. Möglichkeit der Erweiterung jeder Schaltanlage.

3. Leichte Reparierbarkeit.

4. Gute Übersicht über den Maschinenraum von dem Stand des Schaltwärters aus, wenn möglich, bei gleichzeitiger Beobachtung der Hauptinstrumente.

Dazu kamen im Laufe der Zeit die weiteren Forderungen:

5. Möglichste Sicherheit des Bedienungspersonals gegen jede unabsichtliche Berührung zweier blanker Leitungen verschiedener Spannung.

6. Normalisierung auch der Schalttafelkonstruktion, so daß jede beliebige Schalttafel aus listenmäßigen Teilen, die nach den Prinzipien der Massenfabrikation hergestellt sind, zusammengesetzt werden kann, während früher z. B. die Eisenkonstruktionen von Fall zu Fall neu entworfen und von Schlossereien im Kleinbetrieb hergestellt wurden.

Der Amerikaner erfüllte die ersten drei Forderungen durch die Einführung des Feldersystems in den Schalttafelbau: für jede Dynamo, die Akkumulatoren und deren Lademaschinen, für jedes Speisekabel, das die Elektrizität zu den Speisepunkten des eigentlichen elektrischen Verteilungsnetzes fortleitet, werden die notwendigen Apparate zum Regulieren oder Schalten, die zugehörigen Sicherungen und Instrumente auf eine besondere Marmortafel montiert. Diese werden einfach nebeneinander derart aufgestellt, daß die Reihe der Felder sowohl für die Dynamos wie für die Speisekabel beliebig fortgesetzt werden kann, falls diese oder jene vermehrt werden müssen. Auch der Deutsche wendet heute beim Schalttafelbau hauptsächlich Felderkonstruktion an und befriedigt nur sein ästhetisches Bedürfnis durch eine eiserne verzierende Umrahmung, die der nüchterne Amerikaner meist fortließ. Während früher die Verbindung der Apparate Sache des Monteurs war — sie erfolgt fast immer auf der Rückseite der Schalttafel —, wird auch diese heute genau vom Ingenieur projektiert, da nur so leichte Reparierbarkeit und Übersichtlichkeit gewährleistet werden kann.



Abbildung 158. Dieselbe Schalttafel wie Abb. 157, von der Rückseite.

Die Rücksicht auf diese Gesichtspunkte und die Sicherheit des Bedienungspersonals ließ das Schaltwagensystem (eingeführt von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft) entstehen, das besonders bei Hochspannungen in mittleren Grenzen, also etwa bis 10000 Volt, angewendet wird. Sämtliche Instrumente, Schalter und Apparate, soweit sie wieder zu

einer Dynamo, einem Speisekabel usw. gehören, sind auf einem wagenartigen Gestell befestigt, das auf seinen Rädern aus der Reihe der übrigen hervorgezogen werden kann (vgl. Abbildung 159). An seiner Vorderseite sitzen also z. B. die Meßinstrumente und Schalthebel, der eigentliche Wagen trägt den Ölschalter, die Meßtransformatoren und Relais, an seiner Rückseite befinden sich Kontakte, durch die sämtliche Apparate mit einem Male von den Sammelschienen abgeschaltet werden können, und zwar geschieht dies automatisch durch das Vorziehen des Wagens. Es kann also jeder Apparat ohne jede Gefahr an dem ausgeschobenen Wagen nachgesehen werden, oder es kann sogar ein Wagen, z. B. für die Schaltung der Speisekabel, in Reserve gehalten und so ein reparaturbedürftiger, in Betrieb befindlicher Wagen in wenigen Sekunden ausgewechselt werden.

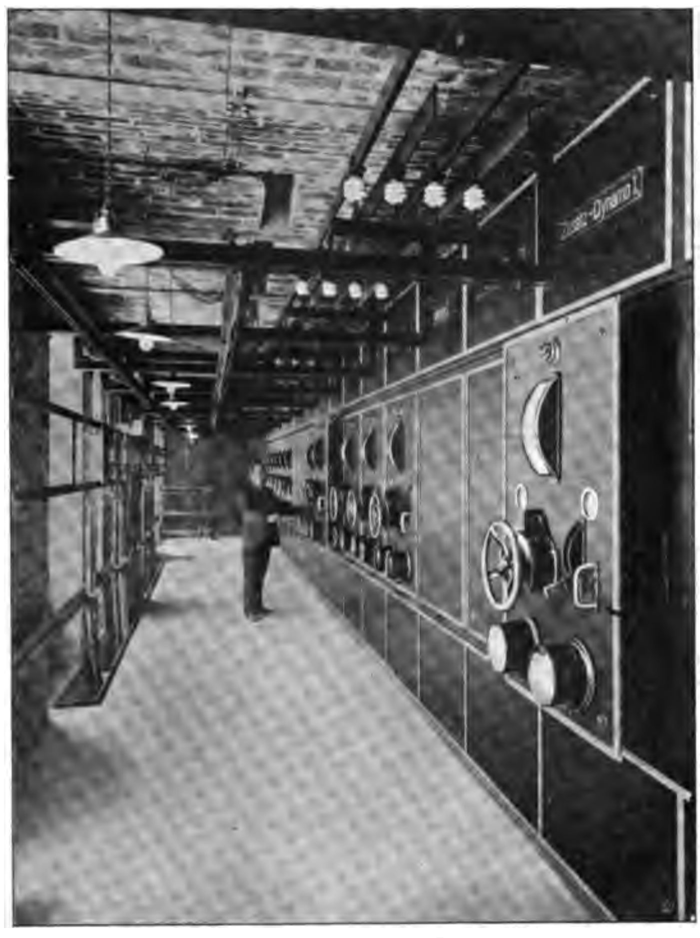


Abbildung 159. Schaltwand nach dem Schaltwagensystem, ausgeführt von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft, Berlin.

Soll der Schalttafelwärter besonders gut den Maschinenraum übersehen können, so wird die Schaltanlage entweder überhaupt hochgelegt oder in Etagen übereinandergebaut, so daß die wichtigeren Dynamoschaltfelder oben mit gutem Überblick, die Speiseleitungsfelder unten liegen, oder die Niederspannungsschalttafel wird unten, die Hochspannungstafel darüber angeordnet. Wird Wert darauf gelegt, daß der Schaltwärter beim Schalten nicht, wie dies meist der Fall ist, dem Maschinensaal den Rücken zuwenden muß, oder müssen Schalteinrichtungen in mehreren Reihen hintereinander angelegt werden, so ist speziell für die Apparate der Dynamos die Schaltsäule am Platze; sie kann sowohl die Instrumente wie die Hebel zur Betätigung der Widerstände zur Spannungsregulierung tragen (vgl. Abbildung 162). Es ist also leicht, bei geeigneter Stellung der Säulen die zu schaltenden Maschinen gleichzeitig zu beobachten. Dasselbe ist der Fall bei indirektem Schalten, wenn ein niedriges Schaltpult genügt für die verschiedenen Druckknöpfe oder kleinen Hebelschalter, welche durch Relais die Fernschalter betätigen; auch bei direktem Schalten wird bisweilen das Pultsystem angewandt.

Bei sehr hohen Spannungen, etwa von 35000 Volt an, wird der Raumbedarf der Schaltanlage außerordentlich groß, man baut für jede Leitung des Drehstroms einen

besonderen Schalter ein, der von den Schaltern für eine andere Phase durch eine feste Wand getrennt ist, während wir bei niedrigeren Spannungen auch beim Fernschaltsystem die drei Phasen in einer Zelle vereinigt finden. Oft sind die Schalter bei Hochspannung in einem besonderen Raum untergebracht, die Blitzschutzvorrichtungen und die Hochspannungstransformatoren ebenfalls, während wir nach einem anderen Prinzip die verschiedenen Schalteinrichtungen durch Gitter und Bedienungsgänge voneinander getrennt im selben Raum hintereinander angeordnet finden.

Die Schalter. Während für alle Niederspannungsanlagen einfache Messerschalter nach Abbildung 167 genügen, die in außerordentlich großer Mannigfaltigkeit gebaut werden und sich auch noch dadurch unterscheiden, ob sie vor oder hinter der Schalttafel angeordnet werden, sind einmal für die Akkumulatoren und dann für alle Hochspannungsanlagen besondere Schalter erforderlich. Die Akkumulatoren sollen ja bald die Leistungen der Dynamos unterstützen, bald allein übernehmen, um zu anderen Stunden wieder neu geladen zu werden. Da die Spannung des Bleiakkumulators, die normal 2 Volt beträgt, bei der Entladung bis auf etwa 1,85 Volt fällt, dagegen bei der Ladung bis auf ca. 2,6 Volt steigt, müssen bei fortschreitender Entladung dauernd mehr und mehr Akkumulatorenzellen zugeschaltet werden; zu ihrer Ladung aber muß die Spannung der Dynamos entweder erhöht oder eine besondere Dynamo mit ihr in Reihe geschaltet werden und deren Spannung dann langsam während der Ladung erhöht werden können. Meist stellt man bei größeren Anlagen die Forderung, daß während des Ladens gleichzeitig die Dynamo Energie an das Netz bei normaler Spannung abgeben kann, dann ist die „Zusatzdynamo" unentbehrlich, oder man stellt auch die weitere Forderung, daß ebenso aus der Akkumulatorenbatterie Energie an das Netz abgegeben werden kann. Die Spannung z. B. von 110 Akkumulatoren, die zusammen die normale Spannung von 220 Volt ergeben, möge beim Laden auf 258 Volt gestiegen sein, dann muß, will man gleichzeitig Strom wieder bei 220 Volt der Batterie entnehmen, bei der 98. Zelle eine Verbindung mit dem Netz hergestellt werden,

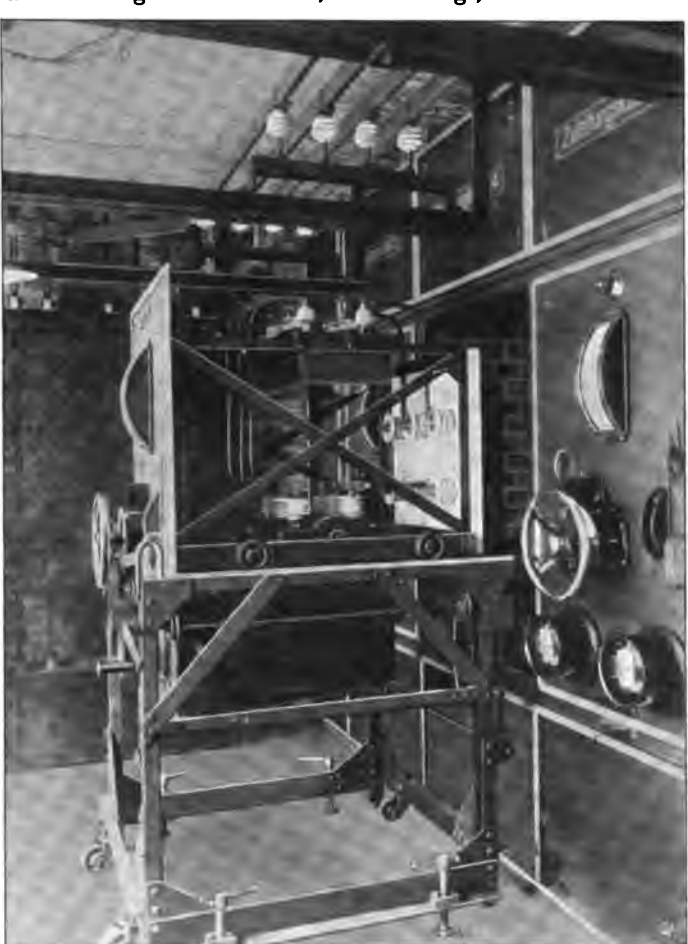


Abb. 160. Einzelner Schaltwagen, zur Reparatur auf ein Hilfsgestell herausgezogen. (Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft, Berlin.)

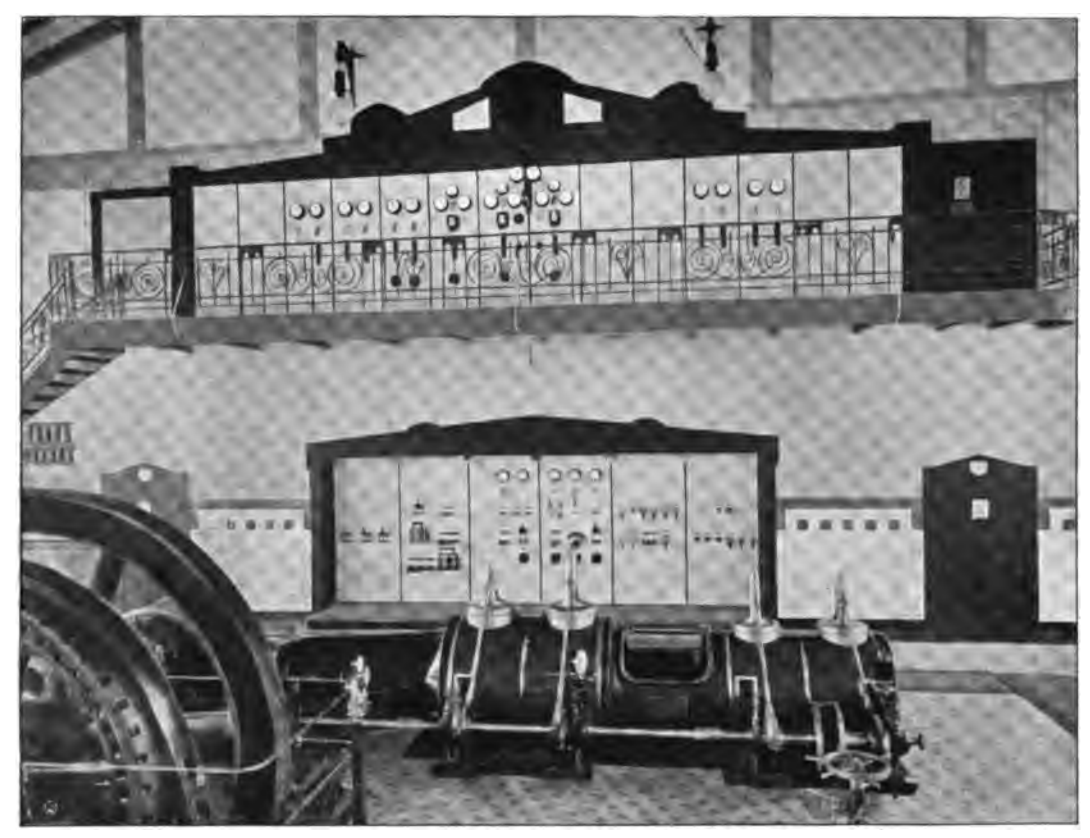


Abbildung 161. Schaltanlage in zwei Etagen der elektrischen Zentrale der Kaliwerke Benterode A.-G. von ca. 2000 KW bei 5000 Volt Betriebsspannung, ausgeführt von der Elektrizitäts-Aktien-Gesellschaft Hermann Poege, Chemnitz.

da $258 \times \frac{98}{110} = 220$ Volt. Auch hier sind je nach dem Ladezustand Zellen zu- oder abzuschalten. Alles dies besorgt der Akkumulatorenzellenschalter; der einfache, falls zu einer bestimmten Zeit stets nur geladen oder entladen werden soll; der doppelte, falls die Möglichkeit gegeben sein soll, beides zu vereinigen. Die Akkumulatorenzellenschalter, die bisweilen bei sehr großen Strömen Zellen zu- oder abschalten sollen, haben hierbei die Forderung zu erfüllen, daß der Strom, der ins Netz geht, nicht unterbrochen wird — das würde ein Zucken der Lampen im Netz hervorrufen —, ebensowenig dürfen die Enden der Zelle, die zu- oder abgeschaltet werden sollen, direkt metallisch miteinander verbunden werden, da alsdann außerordentlich große Ströme durch sie, wenn auch nur für eine kurze Zeit, hindurchfließen würden. Man vermeidet dies schon seit langem durch besondere Schleifkontakte, die aus Doppelbürsten a b mit zwischenliegendem Widerstand w (Abbildung 168) bestehen. Normal wird eine Zelle direkt durch Bürste a mit dem Netz verbunden; bei Zu- oder Abschalten wird kurze Zeit die betreffende Zelle durch den Widerstand w in sich geschlossen, dann geht für einen Augenblick der ganze Netzstrom durch diesen Widerstand, bis Bürste a auf dem nächsten Kontakt angelangt ist und die Stromleitung übernimmt. Ein doppelter Zellenschalter muß zwei derartige Schleifvorrichtungen haben, einen zum Laden, einen zum Entladen; sie sind bei

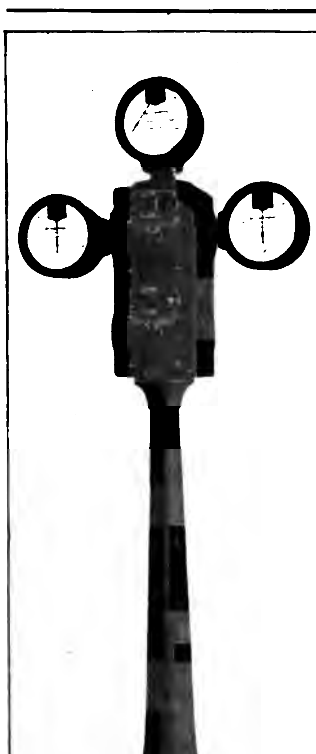


Abbildung 162. Schaltsäule der Allg. Elektr.-Ges., Berlin.

kleineren Typen an Hebeln befestigt, die sich auf der kreisförmig angeordneten Kontaktbahn beliebig einstellen lassen; bei größeren sind die Kontaktreihen sogar getrennt.

Die Forderung, daß die Akkumulatoren zur Nachtzeit trotz Abgabe von Energie die Spannung auch ohne Bedienung konstant halten, führt zu den automatischen Zellenschaltern; bei diesen werden die Schleifvorrichtungen durch eine Spindel über die geradlinig angeordneten Kontaktreihen hinwegbewegt, und diese Spindel kann durch einen Motor derart angetrieben werden, daß er bei jedesmaligem Einschalten die Bürste a (vgl. Abbildung 168) genau um einen Kontakt weiterrückt. Das Einschalten des Motors geschieht durch ein Relais, das sowohl bei zu hoher wie bei zu niedriger Spannung je einen Kontakt schließt.



Abbildung 163. Schaltpult mit Instrumentensäule, ausgeführt für den Hörder Verein der Phönix-A.-G. durch Voigt & Haeffner, Frankfurt a. M.

Für die Schaltung sehr großer Energiemengen, besonders bei Hochspannung, werden nur noch Ölschalter benutzt. Bei jeder Unterbrechung eines Stroms in Luft entsteht genau wie bei einer Bogenlampe ein Lichtbogen, der die Kontakte beschädigen würde, sobald er auch nur einige Sekunden brennen würde, und zwar um so mehr, je schlechter die unvermeidlich entstehende Wärme abgeleitet wird. Das Öl stürzt nun einmal in die entstehende Unterbrechungsstelle zwischen den Schaltmessern und den Kontakten hinein, und statt Luft ist also ein Material von bedeutend höherer Isolationsfähigkeit vorhanden, zweitens

führt das Öl bedeutend besser die Wärme von den Kontakten ab als die Luft. Ähnliche Forderungen wie an das Transformatoröl (s. S. 304) sind auch hier zu stellen. Bei Drehstrom werden mit Ausnahme der höchsten Spannungen alle drei Phasen in einem Ölbehälter unterbrochen. Die Ölschalter sind entweder von Hand ein- oder auszuschalten, oder daneben noch durch Magnetspulen mit Hilfsströmen ausschaltbar, oder schließlich ist beides durch Relais für Fernschaltung möglich. Durch alle Ölschalter, die aus der Ferne ausschaltbar sind, können auch bei Überlastungen oder Kurzschlüssen die überlasteten Leitungen von den Stromquellen abgetrennt werden, falls man sich noch der Maximalrelais, auf die noch im folgenden Abschnitt zurückgekommen wird, bedient; falls die Ölschalter auch durch Relais eingeschaltet werden können, ist ein automatisches Parallelschalten verschiedener Maschinen oder sogar verschiedener Zentralen möglich und sogar schon einige Male ausgeführt worden.

Die Widerstände, die entweder in besonderen Spezialfabriken oder in besonderen Abteilungen der elektrotechnischen Fabriken hergestellt werden und deren Verwendung wir schon mehrfach erwähnten, sollen hier nur kurz gestreift werden. Man kann sie einteilen einmal nach ihrer Bestimmung als Regulier- oder Anlaßwiderstände, diese zerfallen wieder in einfache und Umkehranlaßwiderstände, wenn man die Motoren in beiden Richtungen laufen lassen will, und in automatische Anlasser. Daneben gibt es noch eine große Anzahl für besondere Zwecke. Nach der Art des verwendeten Widerstandsmaterials unterscheidet man Metall- und Flüssigkeitswiderstände. Vom konstruktiven Standpunkt aus unterscheiden sie sich als solche für dauernde Strombelastung (besonders Regulierwiderstände) und kurzzeitige Belastung (Anlasser). Die ersteren müssen eine bestimmte Energie dauernd als Wärme ausstrahlen, die zweiten nur einmal für kurze Zeit in sich aufnehmen, dann steht eine längere Zeit bis zur nächsten Inbetriebsetzung zur Verfügung, in der sie die Wärme an die umgebende Luft abgeben können. Daher werden Regulierwiderstände, aber auch oft gebrauchte Anlasser meist aus Drahtspiralen oder Drahtgittern mit möglichst großer Oberfläche, die sich der Luft darbietet, gebaut. Als Widerstandsmaterial dient Eisen, Nickelin oder Neusilber, die einen verhältnismäßig hohen Widerstand für den elektrischen Strom besitzen. Bei den meisten Anlaßwiderständen muß dagegen momentan möglichst viel Wärme aufgespeichert werden; das ist möglich, wenn man die Drahtspirale in ein Ölbad setzt oder sie mit Zement oder anderen nichtleitenden Materialien umgibt. Derartige Widerstandsdrähte können dadurch kurzzeitig mit bedeutend höheren Stromstärken belastet werden, als es in der



Abbildung 164. Verteilungszelle für Drehstrom, ausgeführt von Voigt & Haeffner für die Phönix-A.-G. in Hörde.

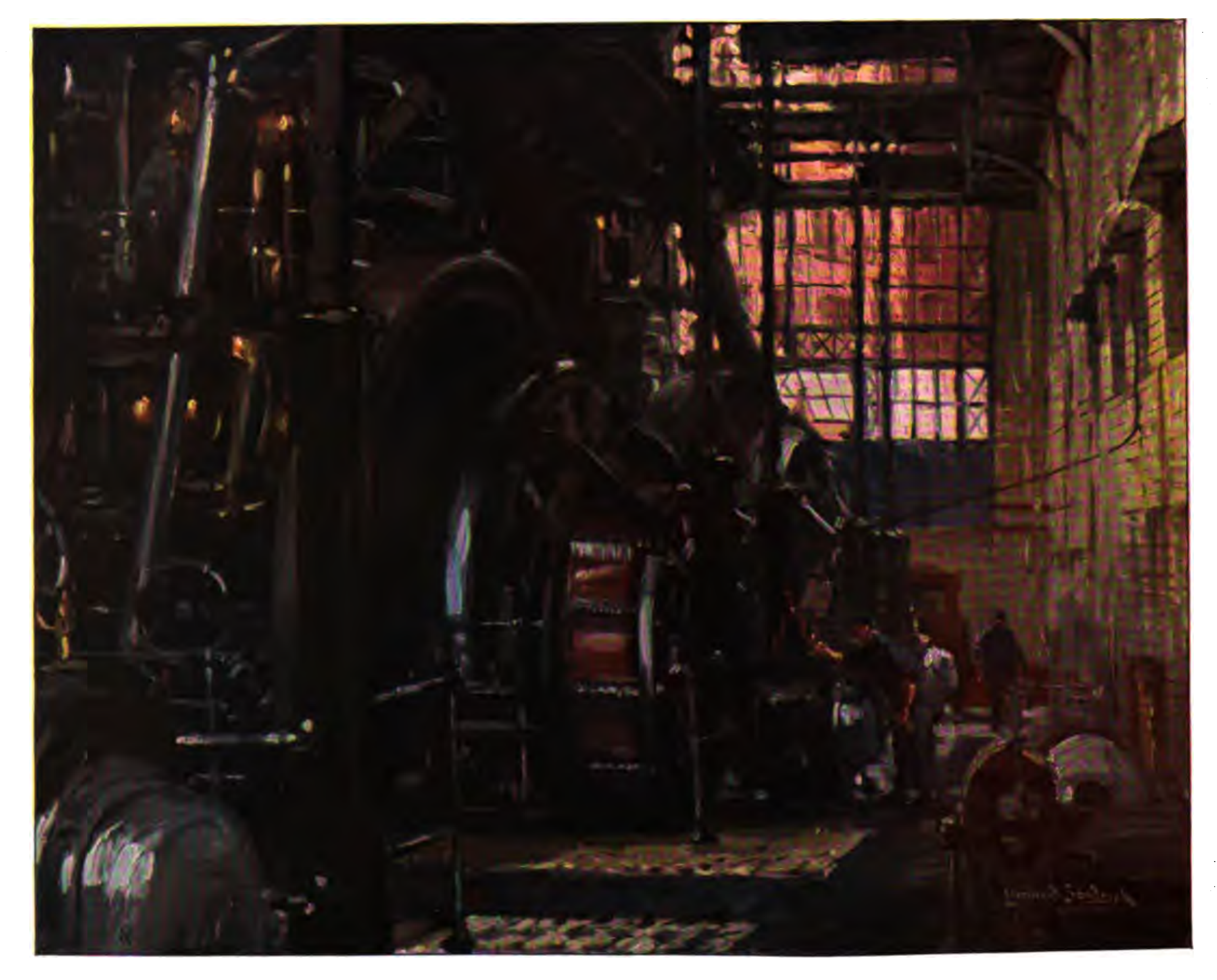
Luft möglich wäre. Sie werden dadurch billiger, können dagegen unzulässig heiß werden, falls man den Motor häufig hintereinander ein- und ausschalten muß, da dann die entstehende Wärme nicht Zeit findet, an die umgebende Luft überzugehen. Als Anlasser für große Motoren dienen auch sehr häufig sogenannte Flüssigkeitswiderstände, d. h. Wassertröge, die mit einer Salzlösung gefüllt sind, in die Metallplatten tiefer und tiefer eintauchen. Zunächst muß der elektrische Strom eine große Flüssigkeitsschicht durchsetzen, es bietet sich ihm also ein großer Widerstand, der dann allmählich vermindert wird. Flüssigkeitswiderstände können höchstens an zu kochen fangen. Auch für große Motoren erhalten diese Widerstände daher kleine Dimensionen, da sie eine große Wärmekapazität besitzen. Anlasser für Motoren werden noch häufig mit besonderen Einrichtungen versehen, so daß sie sich selbst wieder in ihre Einschaltstellung zurückdrehen, sobald z. B. durch eine Betriebsstörung das Netz spannungslos werden sollte. Das ist eine Vorsichtsmaßregel, die es verhindert, daß beim Wiedereinschalten der Spannung von der Zentrale aus nach Behebung der Störung stillstehende Motoranker ohne vorgeschalteten Widerstand noch an das Netz angeschlossen sind. Man bewirkt die Rückdrehung durch eine starke Feder, gegen deren Kraft man den Hebel beim Einschalten drehen muß. In der eigentlichen Fahrstellung wird der Hebel durch eine Magnetspule festgehalten, die vom Netz aus direkt mit Strom versorgt wird. Verschwindet also die Netzspannung, so wird diese Spule stromlos und der Hebel schnellt momentan in die Anfangslage zurück.



Abbildung 165. Generatorwand nach dem Zellensystem für Drehstrom, ausgeführt von Voigt & Haeffner für die Phönix-A.-G.

Durch andere Spulen werden manchmal die Anlaßwiderstände, die mit solchen Federeinrichtungen versehen sind, auch für den Fall ausgelöst, daß der Strom im Motoranker den normalen Wert überschreitet. Sie sichern dann den Motor gegen Überlastungen und Kurzschlüsse. Auf andere Sicherungen zu demselben Zweck wird im folgenden noch näher eingegangen werden.

Besondere Regelungsvorrichtungen in elektrischen Zentralen. Das Problem, die Spannung der Maschinen konstant zu erhalten oder je nach dem Spannungsabfall in den Speise- und Verteilungsleitungen zu erhöhen, ist schon bei den



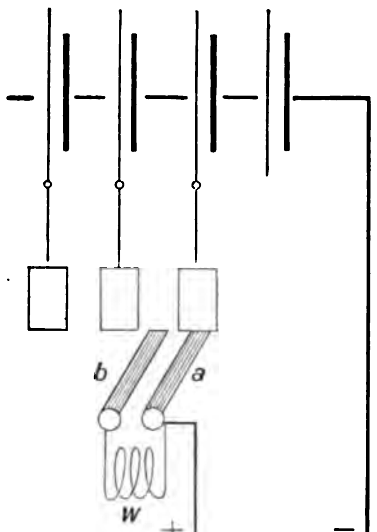
Elektrische Lichtzentrale.

Zu Simons: Die Starkstromtechnik.

Maschinen erwähnt worden und eine scheinbar elegante direkte Lösung für Gleichstrom, nämlich der Compound-Generator (vgl. S. 318), beschrieben worden, während die Rosenberg-Dynamo noch ganz besondere Aufgaben zu lösen hatte. Auch die Wechselstrom- und Drehstrommaschinen hat man auf rein elektrischem Wege zu „compoundieren" vielfach erstrebt, ohne daß sich die bisherigen Lösungen in größerem Maßstabe in die Praxis eingeführt hätten. Der Nachteil aller solcher compoundierten Generatoren für normale Kraft-Licht-Zentralen ist der, daß diese Art der Spannungsregulierung vom Strom abhängig gemacht wird, und zwar von demjenigen, der aus der betreffenden Dynamo ins Netz geliefert wird. Was wird aber verlangt? Aufgabe der Regulierung ist es, die Spannung im Netz, und zwar an den Speisepunkten, von wo die Elektrizität mit geringem Spannungsabfall durch das Verteilungsnetz an die Häuser und Fabriken abgegeben wird, konstant zu halten, unabhängig davon, welche und wieviel Dynamos gerade in der Zentrale laufen. Die Speisekabel sind etwa so berechnet, daß bei voller Belastung der Zentrale 10 % Verlust oder Spannungsabfall in ihnen eintritt. Schaltet man nun z. B. morgens eine einzige Maschine ein, so macht ihr Strom nur einen Bruchteil des maximalen Netzstroms aus; ist aber mit Rücksicht auf die größte Wirtschaftlichkeit (vgl. S. 342) ihre Größe so gewählt, daß sie selbst schon voll belastet ist, so reguliert sie, falls sie übercompoundiert ist, automatisch auf eine etwa um 10 % höhere Spannung ein; das wäre aber erst richtig, wenn auch sämtliche anderen Maschinen parallel geschaltet wären und ihren vollen Strom ins Netz lieferten. Nur bei einer mittleren gleichmäßigen Belastung, also z. B. chemischen oder auch vor allem

Abbildung 166. Schaltwand mit Verteilungszellen. (Voigt & Haeffner für die Phönix-A.-G. in Hörde.)

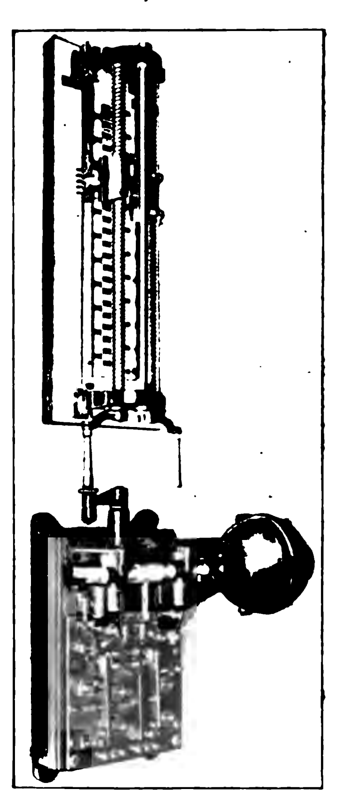
Abbildung 167. Dreipoliger Ausschalter der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft, Berlin.



Abbild. 168. Kontaktfedern eines Akkumulatoren - Zellenschalters.

Bahnzentralen, werden daher compoundierte Maschinen am Platze sein; da schadet es auch nicht, wenn z. B. einmal in den späten Nachtstunden bei verminderter Belastung, wo schon einige Maschinen ausgeschaltet sind, die Spannung an den Speisepunkten zu hoch ist; oder sie kann dann durch Einschalten von Widerstand in den Erregerstromkreis der Dynamos im Nebenschluß von Hand nachreguliert werden.

Für gewöhnliche Kraft-Licht-Zentralen kommen also Schaltungsvorrichtungen in Betracht, die am besten von der Spannung an den Speisepunkten abhängig sind, und das ist nicht durch „Compoundieren" möglich. Man unterscheidet solche, die nur bei langsamen Spannungsschwankungen nachregulieren können, und solche, welche auch bei raschen Änderungen folgen. Die einfachste Methode bei langsamen Schwankungen ist die, daß eben der Schalttafelwärter von Hand die Spannung durch Ein- oder Ausschalten von Widerständen im Feldstromkreis nachreguliert. Die Spannung an den Speisepunkten des Netzes wird dazu durch dünne Drähte in den Kabeln, Prüfdrähte, zur Zentrale zurückgeleitet und dort gemessen. Bei konstruktiv verschiedenen Maschinenaggregaten hat er die Regulierung für jede Maschine einzeln vorzunehmen. Sind in der Zentrale aber eine Anzahl ganz gleicher Maschinen vorhanden, so können die Hebel ihrer Regulierwiderstände mechanisch gekuppelt und alle gleichzeitig von Hand eingestellt werden. Das kann dann auch automatisch durch Spannungsrelais geschehen. Raschen Spannungsänderungen können die automatischen Regulierwiderstände dieser Art aber nicht folgen. Dasselbe gilt von Widerständen, die man früher zuweilen in die Speiseleitungen selbst legte; da durch derartige Widerstände auch noch unnötige Verluste verursacht werden, so werden sie heute als unwirtschaftlich verworfen.


Abbildung 170. Doppelzellenschalter mit geradlinigen Kontaktbahnen. Der Entladeschalter wird durch einen Motor mit Spannungsrelais automatisch angetrieben. Ausführung der Dr. Paul Meyer A.-G., Berlin.


Abbild. 169. Runder einfacher Zellenschalter für Handbetrieb der Dr. Paul Meyer A.-G., Berlin.

Das Problem der Spannungsregulierung bei raschen Schwankungen löst dagegen der Tirrill-Regulator. Soll die Spannung z. B. in einer Drehstromzentrale konstant gehalten werden, so wird nach diesem System der Regulierwiderstand, durch den

der Feldstrom der Gleichstromerreger-Dynamo vergrößert oder verkleinert werden kann, taktmäßig kurzgeschlossen, und nur das Verhältnis der Zeit des Kurzschlusses zu der Zeit der Unterbrechung kann durch ein Spannungsrelais beliebig verändert werden. Der Erregerstrom stellt sich bei diesen raschen periodischen Änderungen auf einen Mittelwert ein, der also alle möglichen Größen annehmen kann. Der größte entspricht dem dauernden Kurzschluß des Regulierwiderstandes, der kleinste dauernder Einschaltung.

Die ganze Vorrichtung hat eine außerordentlich geringe Trägheit, der Regulator folgt den Belastungsschwankungen fast momentan. Auch die Aufgabe der gleichzeitigen Regulierung mehrerer Dynamos wurde nach dem System dieses Schnellreglers gelöst. Ähnliche Lösungen wurden dann auch noch von anderer Seite angegeben.



Abbildung 171. Ölschalter für Drehstrom, geöffnet, mit Auslösemagnet (rechts oben). Die federnden Kontakte und das auch durch Porzellan isolierte Schaltmesser ist sichtbar. Einschaltung durch die Welle links. Fabrikat der Dr. Paul Meyer A.-G., Berlin.

Die Sicherung gegen Überlastung und Kurzschluß. Der elektrische Kurzschluß spielt in den Zeitungen eine größere Rolle als in der Wirklichkeit. Die Feuergefährlichkeit elektrischer Anlagen wird sogar von den Versicherungsgesellschaften geringer eingeschätzt als die anderer Anlagen. Woher kommt aber dann im Publikum der Glaube, daß elektrische Anlagen besonders feuergefährlich sind? Die Möglichkeit der Entstehung eines Feuers liegt natürlich vor, es sind sogar außer dem eigentlichen Kurzschluß noch andere Gründe vorhanden, die zu Bränden Anlaß geben können. Erstens einmal können die Kupferleitungen so stark überlastet werden, daß die in Wärme umgesetzte Energie den Draht zum Glühen, seine Isolationen zum Verkohlen und schließlich benachbarte brennbare Stoffe zur Entzündung bringen kann. Zweitens können stromdurchflossene Leitungen bei normaler Belastung zerrissen werden, es bildet sich dann genau wie bei der Bogenlampe oder bei jedem Schalter ein Lichtbogen. Beide Erscheinungen fallen also nicht unter den Begriff des elektrischen Kurzschlusses. Diesen erhalten wir erst, wenn entweder die trennende Isolation der Leitungen durch Feuchtigkeit, Säuredämpfe oder dergleichen vernichtet wird, oder wenn zwei Leitungen, die unter verschiedener Spannung stehen, direkt miteinander metallisch durch Unvorsichtigkeit verbunden werden. Die Gefahr kann dann wiederum entweder darin liegen, daß an der Stelle der metallischen Berührung sich ein Lichtbogen bildet, oder daß in den Leitungen ein so starker Strom entsteht, daß sie sich, aber vielleicht an einer ganz anderen Stelle als an der des Kurzschlusses, bis zur Rotglut erhitzen. Die Sicherung hat in der elektrischen Anlage nun bekanntlich den Zweck, diese Stelle an einen bestimmten Punkt zu verlegen, wo jede Feuersgefahr ausgeschlossen ist, die Leitung wird auf eine kurze Strecke durch den Sicherungsdraht ersetzt und dieser so schwach gemacht, daß er durchbrennt und damit den Stromkreis unter kurzer Lichtbogenbildung, aber in vollständig

unschädlicher Weise, unterbricht. Die Forderungen, welche an Sicherungen gestellt werden, sind folgende: sie müssen den 1¼fachen Normalstrom dauernd führen können. Vom kalten Zustande aus plötzlich mit der doppelten Normalstromstärke belastet, müssen sie in längstens zwei Minuten abschmelzen. Sie müssen auch bei einer um 10 % erhöhten Betriebsspannung sicher wirken, d. h. ohne daß ein Lichtbogen stehen bliebe. Sie müssen derart gebaut und angeordnet sein, daß ihre Einsätze auch unter Spannung mittels geeigneter Werkzeuge gefahrlos ausgewechselt werden können. Der Lichtbogen, der sich für eine kurze Zeit während des Ausschaltens bildet, und ebenso das eventuell verspritzende Metall darf für die Bedienungsmannschaft keine Gefahr bilden. In früherer Zeit verwandte man als Material für die Sicherungsdrähte allgemein Blei; bei dem verhältnismäßig hohen spezifischen Widerstand erhielten aber solche Schmelzdrähte ein ziemlich beträchtliches Volumen, es bedurfte daher einer großen Wärmemenge, um sie zum Schmelzen zu bringen. Neuerdings verwendet man besondere Legierungen oder Silber, das eine sehr große Leitfähigkeit besitzt, zur Herstellung der Schmelzdrähte, die nun ein bedeutend geringeres Volumen erhalten; daher schmilzt bei einer gegebenen Stromstärke ein solcher Draht bedeutend rascher durch als ein Bleidraht, der dauernd die gleiche Stromstärke ertragen kann. Je größer die Kurzschlußstromstärke, um so rascher wirkt die Sicherung, aber für kurze Momente können auch bei vorhandener Sicherung ganz beträchtliche Stromstärken in einem kurzgeschlossenen Stromkreis fließen. Wie gut gerade Silberdrähte die obengenannten Forderungen erfüllen, ersieht man aus Abbildung 178, in der die Abschmelzzeit in Abhängigkeit von der Abschmelzstromstärke aufgezeichnet ist. Bei doppelter Stromstärke erfolgt das Durchbrennen nicht erst in zwei Minuten, sondern in einigen Sekunden. In Kraft-Licht-Zentralen sind Überlastungen und Kurzschlüsse nicht häufig; meist entstehen Kurzschlüsse nur an den Verbrauchsstellen, und dort sind nochmals Sicherungen, Installationssicherungen, die später noch besprochen werden, eingebaut, wie denn der Verband deutscher Elektrotechniker vorschreibt, daß bei jeder Querschnittänderung des Leitungsnetzes der dünnere Draht unmittelbar an seinem Anfang nach der Zentrale zu durch eine Sicherung zu schützen ist. Deshalb genügen auch in diesen Zentralen Schmelzdrahtsicherungen, die freilich den Nachteil haben, daß es einiger Minuten bedarf, um sie zu ersetzen, falls sie einmal durchbrennen sollten. In Zentralen, wo Überlastungen leicht vorkommen — und das ist bei allen Speiseleitungen für Bahnbetrieb der Fall, wenn z. B. bei einer Verkehrsstockung sich ausnahmsweise viele Wagen an einem Speisepunkt ansammeln können —, genügen derartige Sicherungen nicht. Das



Abbildung 172. Ölschalter für Drehstrom, so zu montieren, daß nur der Handhebel zum Einschalten und das obere Schild vor der Marmortafel. Ausschaltung von Hand oder durch eins der beiden Maximalrelais (links oben), die direkt vom hochgespannten Strom durchflossen werden. Ausführung der Voigt & Haeffner A.-G., Frankfurt a. M.

Auswechseln der Sicherungen würde zu kostspielig und zu zeitraubend sein. In solchen Fällen bedient man sich der Automaten, d. h. Schalter, die sich automatisch öffnen, sobald die Stromstärke einen bestimmten Grenzwert überschreitet. Die meisten derartigen Apparate sind auf der Wirkung aufgebaut, die eine stromdurchflossene Spule auf ein weiches Eisenstück ausübt. Der Apparat tritt in Tätigkeit, sobald die anziehende Kraft groß genug wird, um irgendeine Gegenkraft, etwa die einer Feder, zu überwinden. Man bezeichnet diese Apparate als Maximalausschalter. Es kann auch der Fall eintreten, daß der Stromkreis zu unterbrechen ist, wenn der Strom einen bestimmten Wert unterschritten hat oder gar seine Richtung umkehrt. Auf Seite 284 ist dargestellt worden, wie eine Dynamo, welche eine Akkumulatorenbatterie laden soll, eventuell umgekehrt von der Batterie als Motor angetrieben werden kann; das ist natürlich zu vermeiden, und diesem Zwecke dienen die Minimalausschalter. Ihre Wirkungsweise beruht meist darauf, daß eine vom Strom durchflossene Spule einen Eisenkern so lange festhält, bis die Stärke des Stroms einen bestimmten minimalen Wert erreicht, dann leitet das abschnellende Eisenstück den Ausschaltvorgang ein. Solche einfachen Apparate treten aber bisweilen nicht in Tätigkeit, wenn der Strom sehr rasch auf 0 sinkt und dann wieder in der entgegengesetzten Richtung ansteigt; denn ein Eisenkern wird in das Feld einer Spule hineingezogen, gleichgültig, in welcher Richtung der Strom fließen mag. Auch diese Gefahr wird aber neuerdings in sogenannten „Rückstromschaltern" vermieden.



Abbildung 173. Automatischer Ölschalter für Ein- und Ausschaltung für Drehstrom (zwei Klemmen sind gerade verdeckt) der Voigt & Haeffner A.-G., Frankfurt a. M. Das Gewicht der Schalterteile ist durch Gegengewichte ausgeglichen. Vorn links zwei Magnetspulen nebeneinander: die größere schaltet gegen eine Federkraft den Ölschalter ein, die kleinere löst diese bei Überlastung aus. Im Notfall kann der Schalter auch von Hand betätigt werden.

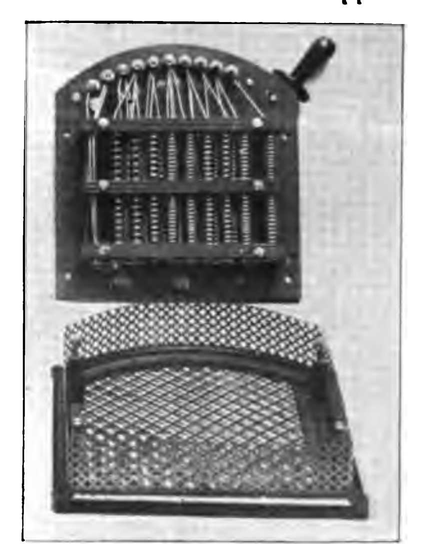


Abbildung 174. Anlasser mit Drahtspiralen von F. Klöckner, Köln a. Rh. Ansicht von hinten, geöffnet.

In allen Hochspannungsanlagen lassen sich Schmelzdrähte nur noch unter besonderen Vorsichtsmaßregeln verwenden, für sehr hohe Spannungen wird man überhaupt zu einem anderen System übergehen. Genau wie die Schalter können die Sicherungsdrähte dadurch wirksamer gemacht werden, daß man sie unter Öl den Stromkreis unterbrechen läßt oder sie auch in Sand, Schmirgel oder dergleichen einbettet. Der entstehende Lichtbogen wird dann rascher wieder erlöschen. Solche Sicherungen werden nach Abbild. 180 als sogenannte „Röhrensicherungen", in Porzellan eingeschlossen, gebaut.

Wie schon früher gesagt, kann man automatisch wirkende Ölschalter auch direkt zur Unterbrechung

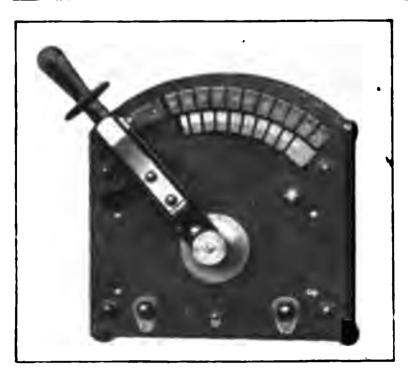


Abbildung 175. Derselbe Schalter wie Abbildung 174 von vorn.

des Stromkreises bei Überlastungen oder Kurzschlüssen benutzen. Zu ihrer Betätigung bedarf es dann eines **Relais**, das bei Überschreitung einer bestimmten Stromstärke in Tätigkeit tritt. Man ersieht ein solches Relais, das wieder auf elektromagnetischer Anziehung beruht, aus Abbildung 181, an dem hohen Porzellankörper erkennt man ohne weiteres, daß es sich um Hochspannung handelt. Sehr vielfach wird aber auch die Kraftwirkung auf eine Aluminiumscheibe oder -zylinder von Wechselstromfeldern (Ferraris-Prinzip) zur Betätigung der Relais verwandt. Von manchen Firmen wird solchen Relais der Vorzug gegeben, die mit Niederspannung arbeiten, dann ist der Einbau eines Stromtransformators in die Hochspannungsleitung erforderlich. Die Schaltung wird also hier schon ziemlich kompliziert: Stromwandler, Maximalrelais, Schaltmagnet und Ölschalter müssen sich in ihrer Wirkung vereinigen, um die Leitungen und Maschinen vor Überlastung zu schützen; man ersieht aber auch daraus, daß man diese Kombination tatsächlich anwendet, welches Zutrauen man zu dem exakten Arbeiten aller Apparate hegen kann. In den ersten großen Hochspannungs-Kraftübertragungen, die mit derartigen Automaten und Relais ausgestattet wurden, ergaben sich aber doch noch praktische Unzuträglichkeiten. Als von Niagara-Falls Energie mit Hochspannung den Unterzentralen in Buffalo zugeführt und von dort wieder weiter verteilt wurde, traten im Falle eines Kurzschlusses sämtliche Automaten, die hintereinander in die Verteilungsleitungen eingebaut waren, in Tätigkeit, sobald der Kurzschlußstrom einen Wert erreichte, der auch den größten unter ihnen in Tätigkeit setzen konnte. Damit wurde aber das ganze Netz unnötigerweise vollständig momentan spannungslos gemacht. Dieser Umstand führte Stilwell zur Konstruktion und Einführung der sogenannten **Zeitrelais**, bei denen die Überlastung eine bestimmte beliebig festzusetzende Zeit andauern muß, bis das Relais einen Stromkreis zur Betätigung des Ölschalters schließt. Das ist konstruktiv auf die verschiedenste Weise möglich. Bei großen verzweigten Hochspannungsanlagen mit automatischen Schaltern werden nun die Zeitrelais so eingestellt, daß die entferntesten, die natürlich auch schon bei der geringsten Stromstärke ansprechen müssen, etwa momentan in Tätigkeit treten; solche in größeren Unterstationen werden auf etwa 3 Sekunden eingestellt, diejenigen in den Speiseleitungen der Zentralen auf 6 und schließlich die, welche die Dynamos sichern sollen, auf 10 Sekunden. Es ist damit die Sicherheit geboten, daß das übrige Netz nun nicht

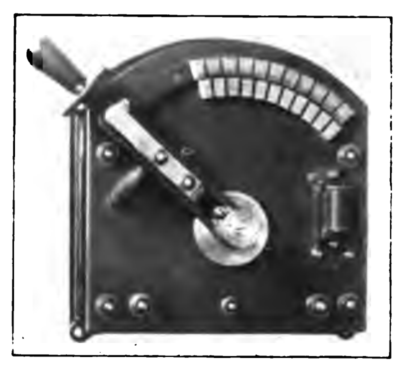


Abbildung 176. Derselbe Schalter von Klöckner, Köln, mit Spannungsrelais (Nullausschalter).

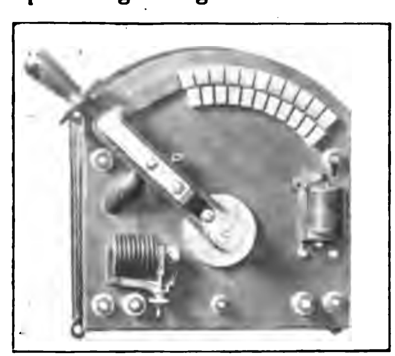


Abbildung 177. Derselbe Schalter von F. Klöckner, Köln a. Rh., mit Spannungs- und Stromrelais zur automatischen Ausschaltung bei Spannungslosigkeit des Netzes und bei Überlastung.

mehr spannungslos gemacht wird, falls schon einer der kleineren Automaten an entfernter Stelle den Kurzschluß hat unterbrechen können.

Fassen wir die verschiedenen Ursachen der Feuersgefahr im elektrischen Betriebe nochmals ins Auge, so kann man also sagen, daß die zu starke Erwärmung der Leitungen infolge von Überlastung oder direkten Kurzschlusses durch die Konstruktion der Sicherungen bei Niederspannungen und der Ölschalter bei Hochspannung ausgeschlossen ist. Ebenso wird das Nachlassen der Isolation nur die Sicherungen durchbrennen lassen. Gefährlich bleibt allein das Zerreißen von Leitungen, welche Strom führen, und der Lichtbogen, der sich bei einem elektrischen Kurzschluß auch dann momentan bilden kann, wenn die Sicherungen und Ölschalter funktionieren. In den seltenen Fällen, wo an der Stelle der Lichtbogenbildung leicht brennbare Materialien vorhanden sind, kann also tatsächlich auch heute noch die elektrische Energieübertragung Brände veranlassen.

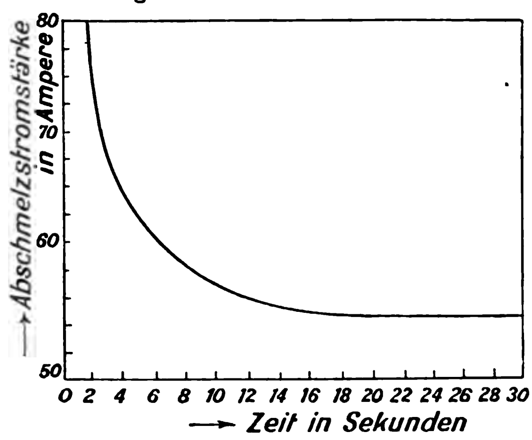


Abbildung 178. Charakteristik der Abschmelzzeit einer Silbersicherung mit zwei Drähten von je 0,8 mm Durchmesser.

Der Blitzschutz. Während man daher sagen kann, daß die Probleme der Sicherung gegen Überlastungen und Kurzschluß im großen und ganzen geklärt sind, stehen wir auf einem anderen Gebiete unter dem Zeichen der Entwicklung. Das ist das Gebiet der Sicherung gegen Überspannungen und direkte Blitzgefahr, ein Gebiet, das um so schwieriger wird, je höher die Spannungen sind, zu denen man bei der Kraftübertragung greift. Auch hier handelt es sich wieder nicht um die Vermeidung einer einzelnen Gefahr, sondern es sind verschiedene Umstände, die in Frage kommen können. Erstens einmal ist es ein direkter Blitzschlag, der die Leitung treffen kann und der unschädlich zur Erde abzuleiten ist. Dann können Blitzschläge geradesogut wie andere veränderliche elektrische Ströme Spannungen in den Leitungen der Kraftübertragung induzieren, auch wenn sie nicht die Leitungen selbst treffen. Aber auch stark geladene Gewitterwolken können hohe Spannungen, die sich gleichmäßig über die ganze Leitung erstrecken, sogenannte „statische" Ladungen hervorrufen, wie bekanntlich jeder isolierte Leiter durch Nähern eines anderen geladenen Leiters „statisch" aufgeladen werden kann. Viertens können abnorm hohe Spannungen durch Schnee- oder Sandstürme hervorgerufen werden, wenn deren Partikelchen durch Reibung die Leitungen elektrisieren, wie das z. B. in den bekannten physikalischen Versuchen

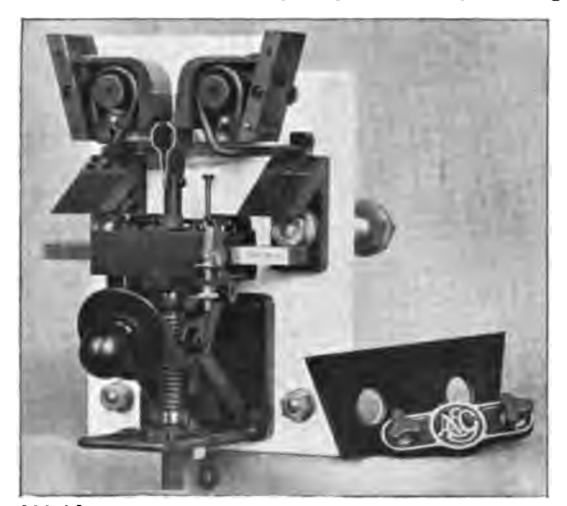


Abbildung 179. Maximalautomat der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft, Berlin, mit entfernter Schutzklappe, Strom unterbrochen.

mit Glas- oder Harzstäben geschieht. Schließlich bringt das Aus- und Einschalten der langen Kabel oder Freileitungsstrecken oft Überspannungen mit sich, und alle diese Überspannungen werden im Betriebe um so unangenehmer, je höher die normale Spannung gewählt wird. Denn während man bei Anlagen für 3000 Volt sehr leicht die Konstruktionsteile so ausbilden kann, daß sie auch noch mehr als das Dreifache, etwa 10000 Volt, aushalten, können wir Materialien, die normal 100000 Volt Widerstand leisten sollen, wahrscheinlich nicht mehr kurzzeitig mit 300000 Volt beanspruchen. Oder der „Sicherheitskoeffizient" nimmt ab mit steigender Spannung. Bei allen Sicherungen gegen Überspannungen ist ferner noch der Umstand zu beachten, daß diese sowohl zwischen den gesamten Leitungen und der Erde, etwa unter Einfluß atmosphärischer Entladungen, entstehen können, als auch zwischen den verschiedenen Leitungen des Netzes selbst bei den Ausschalt- und Einschaltvorgängen. Durch die Überspannungen können einmal die Isolatoren auf der Strecke, dann aber vor allem Apparate und Transformatoren gefährdet werden. Als erste Forderung an alle Blitzschutzvorrichtungen oder, genauer gesagt, Überspannungssicherungen wird also natürlich die aufgestellt werden müssen, daß sämtliche Arten von Überspannungen sicher zur Erde abzuleiten oder zwischen den Leitungen auszugleichen sind; dabei sind Apparate und Transformatoren noch durch besondere Vorrichtungen zu schützen. Die Ableitung zur Erde oder der Ausgleich zwischen den Leitungen muß aber ferner so erfolgen, daß die normale Netzspannung den auftretenden Ausgleichsstrom nicht dauernd als Lichtbogen aufrechterhalten kann. Drittens muß nach jedem Ausgleich der Apparat sofort wieder gegen eine neue Überspannung betriebsbereit sein und sich nicht mit der Zeit in seiner Wirksamkeit verschlechtern. Viertens soll endlich der Ausgleich in einer möglichst kurzen Zeit erfolgen.



Abbildung 180. Röhrensicherung für Hochspannung der Dr. Paul Meyer A.-G., Berlin.



Abbildung 181. Maximalrelais mit einstellbarer maximaler Stromstärke der Voigt & Haeffner A.-G., Frankfurt a. M.

Es ist leicht einzusehen, daß alle die verschiedenen Ursachen, die Überspannungen hervorrufen können, nicht mit einem und demselben Apparat bekämpft werden können. Bei statischen Aufladungen kann es sich trotz hoher Spannung um verhältnismäßig geringe Elektrizitätsmengen handeln, die langsam entstehen und deshalb auch langsam zur Erde

abgeleitet werden können. Bei direkten Blitzentladungen wird es sich häufig um so gewaltige Energiemengen handeln, daß jeder bisher konstruierte Apparat die obigen Forderungen nicht sämtlich erfüllen kann, aber auch bei induktiven Entladungen kann es sich um sehr hohe Energiebeträge handeln.

Bei der Anlage der ersten Hochspannungs-Kraftübertragung in Deutschland war man sich über die vielen Gründe der Überspannungen und die Mittel zu ihrer Beseitigung noch durchaus nicht klar. So wurden die ersten Fernleitungen für Hoch-

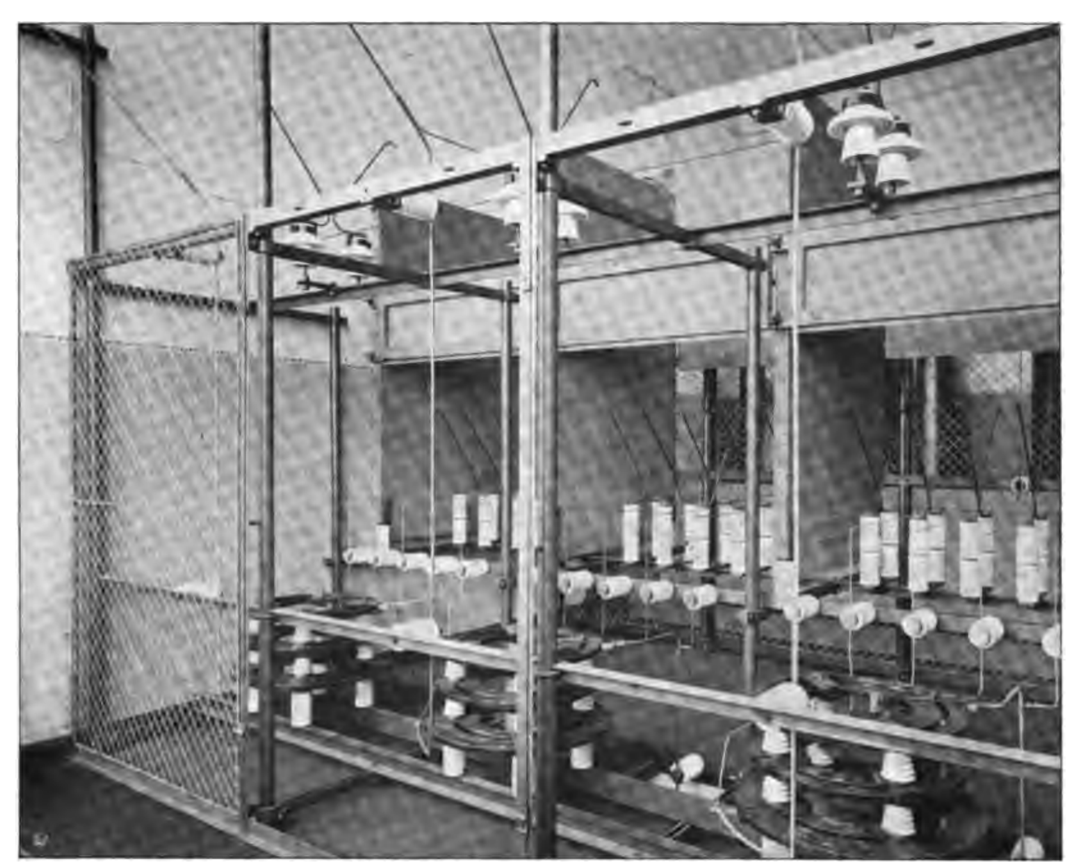


Abbildung 182. Blitzschutzanlage mit Hörnerblitzableitern in der Hochspannungsanlage der Zeche Rheinpreußen, ausgeführt von den Siemens-Schuckert-Werken, Berlin.

spannung von Siemens und Halske in Grünberg mit Schutzdrähten allseitig umgeben, da schon Faraday nachgewiesen hatte, daß ein Mensch, der sich innerhalb eines metallischen Käfigs befindet, niemals elektrisch aufgeladen werden kann. Ein solcher Schutz ist aber zu teuer, hilft auch nicht gegen die Überspannung, die wir durch Ein- und Ausschalten in der Leitung hervorrufen können. Bei einigen Hochspannungsstrecken ist noch ein Draht, der auf der Spitze der Masten geführt wird und an mehreren Stellen mit der Erde leitend verbunden wird, von diesem Käfigsystem übriggeblieben.

Sehr früh tauchten dann auch besondere Blitzschutzapparate auf, von denen an erster Stelle der Hörnerblitzableiter der Siemens-Schuckert-Werke zu nennen ist, der aber heute noch von verschiedenen anderen Firmen gebaut wird. Die kleine Entfernung der Hörner in Abbildung 182 wird so eingestellt, daß sie von der normalen

und auch von einer etwa um 25 % erhöhten Netzspannung nicht durchschlagen werden kann. Bei höheren Spannungen bildet sich dagegen an dieser Stelle ein Lichtbogen, der nun abzureißen ist, sobald die auszugleichende Elektrizitätsmenge zur Erde abgeleitet ist. Dies tritt von selbst dadurch ein, daß der Bogen an den Hörnern in die Höhe wandert, sowohl infolge des Luftauftriebs, als auch infolge einer Kraftwirkung, die der im Lichtbogen fließende Strom durch das magnetische Feld erfährt, das er selbst erzeugt. Er wird dabei immer länger, bis die Spannung ihn nicht mehr unterhalten kann. Der einzige Nachteil des gewöhnlichen Hörnerblitzableiters ist der, daß die Luftstrecken verhältnismäßig sehr klein sind. Zur Überbrückung einer Entfernung von 5 mm gehören bei trockener Luft etwa 15000 Volt. Tiere, Eis und Schnee können daher eventuell zwischen die Hörner geraten und den Apparat außer Betrieb setzen. Man baut ihn daher gern in den Zentralen selbst ein, resp. in den Transformator-Unterstationen. Sonst wird die Forderung der steten Betriebsbereitschaft von ihm erfüllt, da beliebig viele Entladungen hintereinander durch ihn unschädlich zur Erde abgeleitet werden können. Eine Konstruktion der Kölner Land- und Seekabelwerke vermeidet den Übelstand der geringen Entfernung der Hörner, indem sie mit einem derselben eine kleine Hilfsfunkenstrecke verbindet, die mit einer Spitze versehen ist. Bei Spitzen setzt nun eine Entladung bei einer bestimmten Spannung schon auf viel größere Entfernung ein, der Lichtbogen bildet sich daher zunächst an der Spitze, springt dann aber sofort auf die Hörner über, um wieder an ihnen hinaufzuwandern, dabei länger und länger zu werden und endlich abzureißen. Die Entfernung der Hörner kann dabei auf den zwei- und dreifachen Betrag eingestellt werden. Auch zum Abreißen des Lichtbogens beim Durchbrennen einer Sicherung in Hochspannungsanlagen kann der Hörnerblitzableiter benutzt werden (Abbildung 184).



Abbild. 183. Hörnerblitzableiter der Kölner Land- und Seekabelwerke mit Hilfsfunkenstrecke in Tätigkeit. Die kompakten Massen der Hörner wirken günstig auf das Erlöschen des Bogens, der durch seine zeitliche Wanderung ein mehrfaches Bild auf der Photographie ergeben hat.



Abbildung 184. Hochspannungssicherung mit Hörnerblitzableiter der Voigt & Haeffner A.-G., Frankfurt a. M.

Weniger bewährt für große Energiemengen haben sich Walzenblitzableiter (vgl. Abbildung 185), bei denen zwischen lauter walzenförmigen Metallteilen kleine Luftstrecken gebildet werden, die sämtlich bei einer atmosphärischen Entladung von der auftretenden Überspannung überbrückt werden. Hier soll die große kühlende Oberfläche und die großen Metallmassen, die momentan viel Wärme aufzunehmen vermögen, die sichere Unterbrechung des Ausgleichsstroms, der bei Überspannung über die Luftstrecken fließt, gewährleisten. Sie wurden besonders in Amerika vielfach verwandt, da die Hörnerblitzableiter

wegen des Patentschutzes nicht allgemein gebaut werden konnten. Sie bewähren sich auch heute für die Ableitung kleinerer Energiemengen zu hoher Spannung, wie sie beim Ein- und Ausschalten häufig zu vernichten sind. Auch die Zahl der sonstigen Konstruktionen, die den Hörnerblitzableiter verbessern oder ersetzen sollten, ist außerordentlich groß gewesen, wie das wohl jedesmal in der Technik der Fall ist, wenn eine einfache, gute, aber patentierte Lösung einer Aufgabe vorliegt.

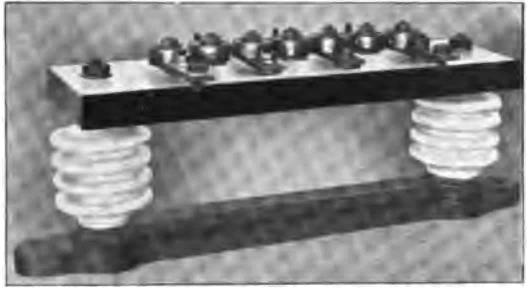


Abbildung 185. Walzenblitzableiter zur Ableitung kleiner Energiemengen, Ausführung der Dr. Paul Meyer A.-G., Berlin.

Es ist noch die Frage zu beantworten, wie man die zu hoch gespannte Elektrizität zwingt, sich nun auch wirklich den Weg zum Ausgleich über die Luftstrecke zu suchen, sie aber daran hindert, zu den Maschinen und Transformatoren zu gelangen. Das geschieht allgemein durch Drahtspulen, Selbstinduktions- oder Drosselspulen genannt, die ein starkes magnetisches Feld erzeugen oder, wie wir gesehen haben, in ihrer Umgebung eine große magnetische Energie aufspeichern können. Schaltet man die Selbstinduktionsspulen nach Abbildung 186, so erfordert es einen beträchtlichen Energieaufwand, bis ein Ausgleichsstrom von beträchtlicher Stärke zu den Transformatoren und Apparaten fließen kann. In derselben Zeit, in der aber die Energie an die Selbstinduktionsspule abgegeben wird, ist der größte Teil der ganzen Energie, die sich bei der Überspannung auf den Drahtleitungen angesammelt hatte, über die Luftstrecke schon zur Erde abgeleitet worden. Dazu gehört freilich noch, daß man ihr Gelegenheit gibt, sich auf dem Wege zur Erde oder in der Erde selbst in eine andere Energieform zu verwandeln, und zwar in Wärme. Deshalb wird in die Erdleitung der Hörnerblitzableiter noch ein besonderer Widerstand eingebaut. Aus Abbildung 187 ersieht man die Anordnung einer Anzahl Hörnerblitzableiter,

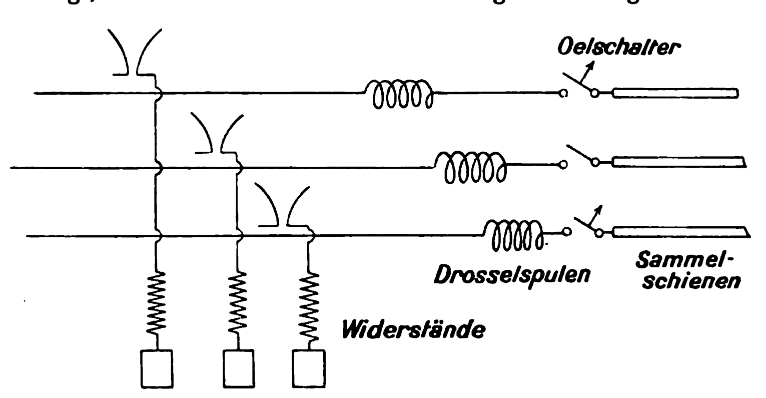


Abbildung 186. Schematische Darstellung der Anordnung der Blitzschutzvorrichtungen.



Abbild. 187. Blitzschutz, bestehend aus Hörnerblitzableitern, Drosselspulen und Widerständen, die in Kästen eingebaut sind, für die Queißtalsperre, Marklissa, ausgeführt von den Siemens-Schuckert-Werken, Berlin.

der dazugehörigen Selbstinduktions- oder Drosselspulen und der Widerstände, die in diesem Falle in große Gefäße mit Öl eingebaut sind. Auch zwischen den Leitungen werden vielfach besondere Hörnerblitzableiter eingebaut, die häufig feiner einregulierbar sind, sie sollen Überspannungen zwischen jenen sofort ausgleichen, denn der Weg über je zwei Hörnerblitzableiter und die Erde würde erst bei viel zu hohen Spannungen von der Elektrizität eingeschlagen werden.

Außer diesen Apparaten zur Ableitung verhältnismäßig großer Energiemengen findet man in manchen noch besondere Vorrichtungen besonders gegen statische Ladungen. Entweder kann dazu z. B. ein Punkt der Hochspannungswicklung des Transformators, und zwar etwa gerade die Mitte von allen Windungen, dauernd mit der Erde verbunden werden, oder man schaltet noch besser direkt an die verschiedenen Klemmen der einzelnen Phasen sehr hohe Widerstände ein, deren entgegengesetztes Ende dauernd mit der Erde verbunden ist. Es fließt dann freilich auch ununterbrochen eine gewisse Energiemenge aus dem Netz zur Erde ab, aber demselben Wege können dann auch alle Energiemengen folgen, die in der früher genannten Weise durch Überspannung sich im Netz ansammeln wollen. Am besten eignet sich als solcher Widerstand ein Wasserstrahl, der gegen die Leitungen gespritzt wird. Man nennt diese Apparate Wasserstrahlerder und ersieht eine Form ihrer Konstruktion aus Abbildung 188.



Abbildung 188. Wasserstrahlerder für Drehstrom der Siemens-Schuckert-Werke, Berlin. Das Wasser fließt hier aus dem geerdeten Kasten oben, die trichterförmigen Hochspannungspole berührend, in den unteren Kasten und zurück.

Von anderer Seite wird auch die Einschalung von Kondensatoren zwischen den zu schützenden Leitungen und der Erde warm empfohlen.

Auch auf dem Gebiete des Überspannungsschutzes ist man also heute auf dem besten Wege, zu einer Klärung der Ansichten und zur Gewinnung von Konstruktionen zu gelangen, die sämtlichen oben aufgestellten Forderungen gerecht werden, besonders da alle Firmen aufs eifrigste sowohl mit der Theorie wie mit der praktischen Durchführung der Apparate beschäftigt sind.

DIE VERTEILUNG DER ELEKTRIZITÄT. Konstruktive Teile der Verteilungsanlagen. Man unterscheidet bekanntlich Freileitungs- und Kabelanlagen. Bei ersteren ist die Entwicklung der die Leitung tragenden Isolatoren von höchster Bedeutung für die Höhe der zulässigen Spannung und die Sicherheit des Betriebes gewesen und wird es auch fernerhin sein. Nur in früherer Zeit hat man Versuche mit Glasisolatoren gemacht, gelegentlich in Europa, sehr vielfach in Amerika, heute beherrscht aber der Porzellanisolator uneingeschränkt das Feld. Die Forderungen, die man an einen guten Isolator stellt, sind etwa folgende: Sicherheit gegen Durchschlag durch die Porzellanmasse hindurch und gegen Überschläge, die von dem Leitungsdraht und dem ihn haltenden Drahtbunde aus zu der Eisenstütze erfolgen können, entweder an der Oberfläche des Isolators entlang oder zum Teil durch die Luft hindurch. Diese Sicherheit muß auch bei Regen, Schnee und Frost gewährleistet sein.

Insekten und andere Tiere dürfen die Isolationseigenschaften nicht verschlechtern können, indem sie sich in den Isolatoren festsetzen. Ferner fordert man mechanische Festigkeit auch gegen seitlichen Zug, eine leichte und sichere Befestigung auf der Stütze, möglichst geringes Gewicht und billigen Preis. Der richtigen Formgebung und Konstruktion der Isolatoren stand, sobald man zu höheren Spannungen übergehen wollte, zunächst die Unkenntnis der Gesetze im Wege, welche die elektrischen Entladungen durch Luft hindurch und speziell an der Grenzfläche zweier Medien entlang bestimmen. Auch die Frage der richtigen Glasur machte viel Kopfzerbrechen, ebenso der Einfluß, den mehrere isolierende Schichten hintereinander auf die Isolierfähigkeit ausüben, da bei den Isolatoren doch die eigentliche Porzellanmasse von der aus Silikaten bestehenden Glasur umgeben ist. Der Eintritt einer Entladung in Luft ist nicht von einer bestimmten Spannung abhängig, auch nicht von einer bestimmten elektrischen Dichte auf einem Leiter, sondern von einem bestimmten elektrischen Spannungsgefälle in der zu durchschlagenden Luftstrecke; die Spannung selbst, der Abstand, der zu durchschlagen ist, und der Wassergehalt der Luft, ferner die Form der Leiter, auf denen sich die Elektrizität sammelt, und das Vorhandensein von Isolationsmaterialien in ihrer Nähe, erst alle diese Umstände zusammen entscheiden über den Eintritt der gefürchteten Entladungen. Aus der Unkenntnis der Vorgänge heraus wurden in der Konstruktion der Isolatoren viele Fehler gemacht. Zunächst befürchtete man nur Entladungen längs der Oberfläche, und daher suchte man nur diese möglichst lang zwischen Draht und Stütze zu machen. Ein Isolator nach Abbildung 189 erträgt nur geringe Spannungen, etwa bis 1000 Volt, aber es war falsch, diese Form durch eine Abänderung nach Abbildung 190 für höhere Spannungen brauchbar machen zu wollen, da die engen Zwischenräume sich dann bei seitlichen Schneestürmen vollsetzten. Die Leitung an der Oberfläche entlang versuchten andere durch Ölrinnen zu hindern (Abbildung 191), aber die Insekten ertränkten sich im Öl und bildeten leitende Brücken, oder Wasser wurde bei Sturm eingetrieben, und, falls leichtes Öl gewählt worden war, sank das Wasser nach unten, und bald befand sich in den Rinnen Wasser statt Öl.



Abbildung 189. Isolator für Spannungen bis 1000 Volt der Porzellanfabrik Hermsdorf, S.-A.

Abbildung 190. Isolator mit zu engen Zwischenräumen zwischen den Mänteln.

Alle neueren Isolatoren sind daher auf dem Prinzip schirmartiger, mehrfacher Mäntel aufgebaut (Abbildungen 192 u. 193), wodurch möglichst viele stets trockene Oberflächen gebildet werden, in den keilförmigen Zwischenräumen können sich weder Tiere noch Schnee festsetzen, und vor allem wird gleichzeitig die zu durchschlagende Luftstrecke groß. Da der äußerste Mantel oder Schirm vor allem alle übrigen Teile möglichst trocken halten soll, selbst aber von außen jederzeit naß und leitend werden

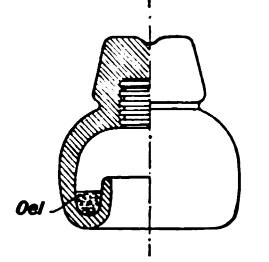


Abbildung 191. Veralteter Ölisolator.



Abbildung 192. Moderner Hochspannungsisolator der Porzellanfabrik Hermsdorf, S.-A., geprüft bei Trockenheit bis zum Überschlag.

darf, hat die Porzellanfabrik Hermsdorf ihn bisweilen bei großen Typen überhaupt gleich aus Metall gemacht und erreicht dadurch bei gleich gutem Schutz leichteres Gewicht und billigeren Preis (vgl. Abbildung 194).

Bei 50000 Volt Betriebsspannung fangen aber alle derartigen Konstruktionen an, gewaltige Dimensionen anzunehmen, ihre mechanische Beanspruchung wird sehr ungünstig, ihre Befestigung auf den Isolatorstützen sehr schwierig. Da begann man neuerdings auf Anregung von Amerika, Hängeisolatoren für die höchsten Spannungen einzuführen. Der Kupferdraht wird an Isolatoren, diese wieder an dem Leitungsgestänge aufgehängt, eventuell werden sogar mehrere Isolatoren aneinandergehängt, im Gegensatz zum bisherigen Stützprinzip. Der Vorteil ist der, daß das neue Prinzip zu leichteren Konstruktionen führt bei gleicher Sicherheit, daß sich besondere Beanspruchungen leichter ausgleichen können, die z. B. entstehen, sobald die Leitungen nicht geradeaus geführt werden können. Neuere Hängeisolatoren, die sich auch für die höchsten bisher gewählten Spannungen wohl bewährt haben, sind aus den Abbildungen 195 und 196 zu ersehen. Wie weit es wirtschaftlich richtig ist, die Stützisolatoren in Fällen, wo sie sich bisher wohl bewährt haben, durch Hängeisolatoren zu ersetzen, muß die Zukunft lehren.

Abbildung 193. Derselbe Isolator wie Abbildung 192, aber naß geprüft.

Der Entwicklung der Isolatoren parallel ging diejenige anderer Porzellankonstruktionen, z. B. für die Einführung der Leitungen in die Häuser, zu den Transformatoren usw., anderseits die ihrer Befestigung. Die Freileitungen wurden früher durchgängig auf Holzmasten verlegt. Diese gegen das Faulen und gegen Insekten zu schützen, war eine Aufgabe, die schon lange die Telegraphentechnik beschäftigt hatte; Imprägnieren mit Kupfervitriol, Kreosol u. a. verlängerten auch in Starkstromanlagen die Lebensdauer der Masten, besonders als man sie sehr vielfach statt direkt in die Erde in Betonklötze einsetzte. Für schwere Verteilungsleitungen (Kreuzungspunkte) und wichtige Hochspannungsleitungen genügten schließlich Holzmasten nicht. Man griff zu schmiedeeisernen M a s t e n, die meist auch in einem Betonklotz befestigt wurden. Ganze Hochspannungsnetze sind auch mit ⊔-förmigen Trägern als Masten ausgebaut worden. Die neu aufkommende Technik des Eisenbetons wandte sich auch der Frage der Masten zu. Schon sind die verschiedensten Formen in Eisenbeton ausgeführt worden und entsprechen den ge-



Abbildung 194. Isolator für Hochspannung mit Metallschirm der Porzellanfabrik Hermsdorf, S.-A.

hegten Erwartungen. Es gibt sowohl solche, die in mannigfaltigen Formen gegossen sind, als auch neuerdings solche, die als runde hohle Röhren durch ein Schleuderverfahren erzeugt werden. Bei diesen besteht das eiserne Gerippe aus geraden Stahlstäben von der Länge der Masten, die durch eine äußere und eine innere Eisenspirale in Röhrenform zusammengehalten werden. Dieses Eisengerippe wird mit einer entsprechenden Menge Zementmörtel und Quarzsand zusammen in glatte Holzformen eingebracht und diese nun durch Maschinen in rasche Drehung versetzt. Durch die Zentrifugalkraft wird der Beton nach außen geschleudert und so ein hohler Mast von der äußeren Gestalt der Holzform gebildet; das Eisengerippe liegt etwas unter der Oberfläche im Beton eingebettet. Holzmasten haben gegenüber Eisen- und Betonmasten den Nachteil, bei Hochspannung dann in Brand geraten zu können, wenn ein Isolator zerbricht oder durchschlägt und der hochgespannte Strom nun unter starker Wärmeentwicklung zur Erde fließt. Von manchen Leitern von Überlandzentralen wird diese Eigenschaft freilich auch gerühmt, weil die Stelle des Durchschlags sofort klargestellt und sogar von jedem Laien an die Zentrale gemeldet werden kann, an einem Eisenmast mit einem im Inneren der Porzellanmasse durchschlagenen Isolator sieht man dagegen nichts. Ein brennender Mast als Kurzschlußanzeiger ist aber sicherlich ein Notbehelf; es ist natürlich besser, sich der haltbareren Eisen- oder Betonmasten zu bedienen, wenn es ihr Preis zuläßt, und durchschlagene Isolatoren auf andere Weise kenntlich zu machen.



Abbildung 195. Neuer Hängeisolator, aus zwei Elementen zusammengesetzt. Fabrikat der Porzellanfabrik Hermsdorf, S.-A.

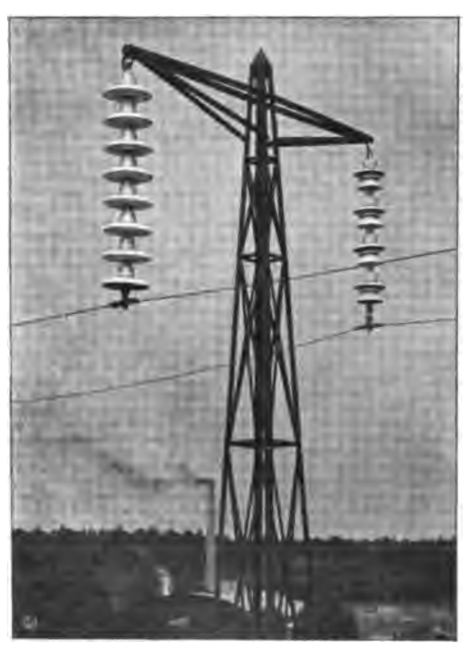


Abbildung 196. Versuchsstrecke mit verschiedenen Hängeisolatoren der Porzellanfabrik Hermsdorf, S.-A.

Die Kabel. In allen größeren Städten verteilt man bekanntlich die Elektrizität durch Kabel, was die ästhetisch unschönen Drähte aus den Straßen entfernt, die Gefahr von Kurzschlüssen bei Stürmen, des Eindringens hoher Spannungen in die Telegraphen- und Telephonleitungen und vor allem die Blitzgefahr beseitigt. Der Fabrikation der Kabel für elektrischen Starkstrom standen die älteren Erfahrungen der Telegraphentechnik zur Verfügung; es besteht das Bleikabel bekanntlich aus der Kupferseele, der Isolation aus Gummi, Jute oder Papier und dem Bleimantel; solcher Mäntel kann es auch mehrere erhalten, wenn man nicht sicher ist, einen einzigen Bleimantel ohne jede Blasen und Risse herstellen zu können. Alle Bleikabel werden bekanntlich

schon lange mit einer Bleihülle ohne jede Naht umpreßt. Durch eine weitere Umspinnung oder Umwicklung, erst mit Jute, dann mit Eisendrähten oder Eisenband, entsteht das armierte Bleikabel. Wird die Jute nur mit Asphalt getränkt, so hat man das asphaltierte Bleikabel. Einfache Bleikabel sind solche mit einer einzigen Kupferseele, die freilich wieder aus einer ganzen Anzahl von Drähten zusammengeflochten sein kann; alle diese Drähte sind dann aber direkt metallisch verbunden und bilden einen einzigen Leiter für den elektrischen Strom. Mehrfache Kabel unterscheidet man je nach der Anordnung der verschiedenen Kupferseelen als verseilte oder konzentrische Kabel sowohl für Wechsel- wie für Drehstrom, also mit zwei oder drei Leitern im Inneren. Die verseilten überwiegen heute stark, und zwar mit Leitern von segmentförmigem Querschnitt, was die notwendige Isolation auf ein Mindestmaß herabsetzt, Abbildung 197. In der Kabelfabrikation speziell für die Verteilungs- und Speiseleitungen, die meist als armierte Bleikabel ausgeführt werden, tritt auch bei höheren Spannungen Papier als Isolationsmaterial immer mehr in den Vordergrund. Es ist billiger als Gummi und doch von hoher Isolationsfähigkeit, kann in sehr gleichmäßiger Qualität hergestellt und noch mit den verschiedensten Imprägnierungsmitteln getränkt werden, die seine isolierenden Eigenschaften noch steigern. Der größte Teil aller Starkstromkabel wird für Niederspannungsanlagen, also für 110 und 220 Volt Betriebsspannung, hergestellt, aber auch in der Hochspannungstechnik steigt der Verbrauch an Kabeln mehr und mehr, nicht allein wegen der obengenannten Vorzüge; Hochspannung in Städte direkt einzuführen, ist selbstverständlich überhaupt nur durch Kabel möglich, da die Hochspannungs-Freileitungen in städtischen Straßen eine ständige Gefahr für die Bewohner bilden würden. Früher mußte man daher die Hochspannung an der Peripherie der Städte heruntertransformieren. Handelte es sich um solche großer Ausdehnung, so war aber von dort die direkte Verteilung mit Niederspannung noch ausgeschlossen; man transformierte also auf eine mittlere Spannung, etwa 3000 Volt, für die schon Kabelkonstruktionen vorlagen, ging unter dieser Spannung zu weiteren Transformatoren- oder Umformer-Unterstationen, in denen die Spannung endlich auf die Gebrauchsspannung von 110 oder 220 Volt herabgesetzt werden konnte. Heute werden Kabel bis zu 10000 Volt schon von allen größeren Kabelfirmen listenmäßig geführt, auch Anlagen mit 24000 Volt sind keine Seltenheit mehr und die Firmen eifrig damit beschäftigt, für immer höhere Spannungen geeignete Konstruktionen durchzuführen. Man kann daher heute schon mit Kabeln für 24000 Volt in das Herz der Städte eindringen und spart dabei die Zwischenstation. Es ist dies also ein großer wirtschaftlicher Vorteil, der die Kabeltechniker zu immer weiteren Fortschritten auf dem Gebiete der Hochspannungskabel anspornt. Aus einer genaueren Kenntnis der Entladungserscheinungen auf der einen Seite, der Eigenschaften der Materialien auf der anderen gelang es dabei, mit den Dimensionen der isolierenden Schicht stark her-

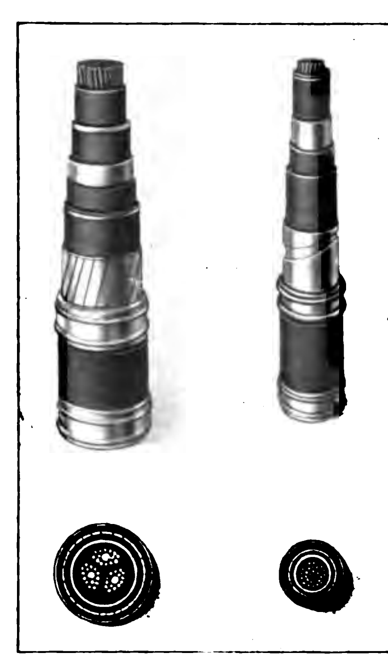


Abbildung 197. Eisenbandarmierte Kabel der Siemens-Schuckert-Werke, Berlin. Rechts Einfachkabel von 120 qmm Querschnitt mit Gummiisolation für 700 Volt, links Drehstromkabel von 3 × 95 qmm mit Papierisolation für 2000 Volt.

unterzugehen. Für 24000 Volt genügen 11—13 mm. Die ganze Herstellung der Kabel erfolgt in einem einzigen fortlaufenden Prozeß auf der Kabelmaschine, deren interessantester Teil vielleicht der ist, in dem das Blei unter hohem Druck, aber nicht allzu hoher Temperatur um die isolierte Kupferseele als nahtloser Mantel gepreßt wird. Die Fabrikationslängen, die in modernen Kabelwerken erzielt werden können, sind recht beträchtliche. Die Siemens-Schuckert-Werke fertigen heute Kabel mit 8000 kg Gewicht der Kabelseele in einem Stück an. Das Gewicht des zum Verlegen fertigen Kabels kann alsdann bis 15000 kg betragen. Handelt es sich z. B. um ein dreifaches armiertes Kabel von 25 qmm Kupferquerschnitt pro Seele, so kann eine Länge von 2 km ohne Unterteilung in einem Fabrikationsvorgange hergestellt werden — eine außerordentliche Leistung.

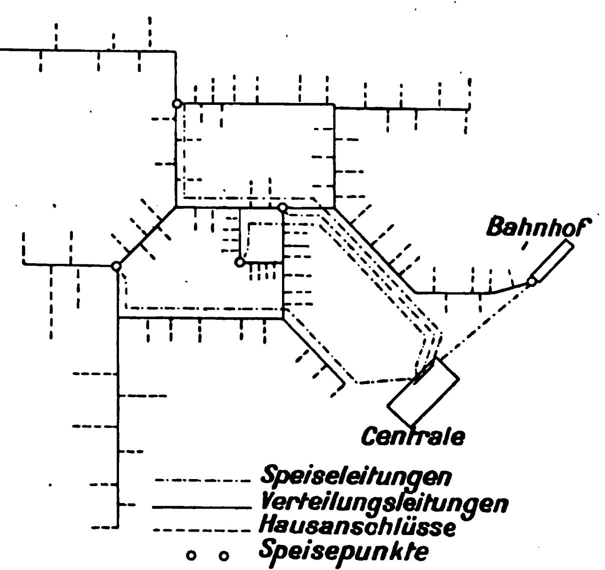


Abbildung 198. Verteilungsnetz mit Maschen.

Je größer die Länge, desto geringer die Anzahl der Kabelmuffen, in denen der Anschluß derart erfolgt, daß die Kabelseelen vorsichtig abisoliert und mit denjenigen der nächsten Kabelstrecke verbunden werden. Die Leiter werden so gebogen, daß ihr Abstand in der Muffe viel größer als im Kabel selbst wird, während auch noch ein genügender Abstand von der Muffe gewahrt bleibt, dann wird die ganze Muffe mit einem geeigneten Isolationsmaterial ausgegossen. Die Muffen sind stets schwache Stellen in der Kabelkonstruktion, besonders da die Verbindung nicht gleichmäßig durch Maschinen bewerkstelligt werden kann, sondern an Ort und Stelle, zuweilen unter erschwerenden Umständen, von dem Streckenmonteur hergestellt wird, so daß mit allen Zufälligkeiten des Handbetriebes gerechnet werden muß.

An den Übergangsstellen zu Freileitungen oder zu den ohne Bleimantel isolierten Leitungen in den Gebäuden hat der Kabelendverschluß für genügende Isolation zu sorgen, auch er ist ein wunder Punkt aller Anlagen, besonders wenn er im Freien allen Unbilden der Witterung gewachsen sein soll. Alle Fortschritte auf dem Gebiete der Hochspannungs-Kabeltechnik würden also nichts helfen, wenn nicht Muffen und Kabelendverschlüsse in der gleichen Weise in der Güte der Konstruktion fortschreiten.

Die Anordnung der Leitungen. Jede Versorgung durch Gleichstrom erfolgt durch ein Verteilungsnetz, an das einerseits die Hausleitungen, anderseits die Speiseleitungen, die von der Zentrale die elektrische Energie zuführen, angeschlossen sind. Die Verteilungsleitungen können ein ganzes Netz mit vielen „Maschen" (vgl. Abbildung 198) bilden, so daß jeder Hausanschluß auf mehreren Wegen über verschiedene Speise- und Verteilungsleitungen erreicht werden kann. Infolge eines Kabeldefektes kann daher in solchen Netzen niemals der Betrieb ganz unterbrochen werden, wenn jedes Kabel ausschaltbar gemacht wird. Die elektrische Energieverteilung mit Wechselstrom kann nach demselben System vorgenommen werden, nur werden meist die Speiseleitungen nicht direkt von einer Zentrale, sondern von einer Transforma-

toren-Unterstation kommen, in der die in der Zentrale erzeugte Hochspannung herabtransformiert wurde. Anderseits können wir speziell bei Überlandzentralen häufig ein sich immer weiter verästelndes Verteilungsnetz mit Hochspannung finden, wo also jeder Punkt nur auf einem Wege mit der Zentrale verbunden ist; jeder Abnehmer besitzt seinen eigenen Transformator. Natürlich können auch Kombinationen beider Systeme vorkommen. Auch bei Wechselstromanlagen, die nach dem Verästelungsprinzip gebaut sind, ist es erwünscht, wenigstens in der Hauptleitung eine Reserve für den Fall eines Defektes zu haben, eine Reserve, die das „Maschensystem" mit einer größeren Anzahl Speisekabel ohne weiteres bietet. Das ist bei größeren Anlagen zuweilen möglich, indem man z. B. für Drehstrom sechs Leitungen auf der Hauptstrecke verlegt, von denen normal je zwei parallel geschaltet sind. Im Notfall kann dann aber auch — freilich bei größerem Spannungsabfall — mit der Hälfte der Leitungen weitergearbeitet werden. Muß eine Freileitung über einen breiteren Fluß geführt werden, so daß die normale Beanspruchung der Kupferleiter überschritten werden muß, weil die Masten doch nur bis dicht ans Flußufer vorgerückt werden können, so findet man auch zuweilen vier Leitungen für Drehstrom gerade für diese kurze Strecke montiert; die eine ist stets als Reserve für eine der drei anderen schaltbar.

Die fast allgemein übliche Verteilung für Licht in den Städten ist das mit Verteilungsleitungen unter „Maschen"bildung. In den Speisepunkten müssen die verschiedenen Verteilungskabel mit den Speiseleitungen zusammengeschlossen werden, dazu dienen Verteilungskästen, die beliebig zugängig und besonders gegen Feuchtigkeit zu sichern sind. Die Dimensionierung der Kabel hat, wie schon häufiger erwähnt, einmal mit Rücksicht auf den zulässigen Spannungsabfall bis zur Konsumstelle zu erfolgen, anderseits muß aber auf ihre Erwärmung Rücksicht genommen werden. Gerade das heutige Bestreben der Kabelfabriken, die Dimensionen der Isolation durch Verbesserung des Materials herunterzusetzen, zeitigt da den weiteren Vorteil, daß die Wärme auch besser und rascher abgeleitet wird, denn alle Isolationsmaterialien sind zugleich schlechte Wärmeleiter, was physikalisch eng zusammenhängt. Nach den jetzt gültigen Normalien darf einem im Erdboden verlegten Bleikabel für Spannungen bis 700 Volt, da es seine Wärme gut an den Erdboden abgeben kann, folgende Belastungen zugemutet werden: Kabel von 1 qmm 24 Ampere; von 4 qmm 55 Ampere; von 10 qmm 95 Ampere; von 120 qmm 450 Ampere; von 1000 qmm 1585 Ampere. Dagegen dürfen gewöhnliche Leitungen und ebenso Kabel, die nicht im Erdboden verlegt sind, nur mit viel geringeren Stromstärken belastet werden, z. B. Kabel von 1 qmm mit 11 Ampere; von 4 qmm mit 25 Ampere; von 10 qmm mit 43 Ampere; von 120 qmm mit 280 Ampere; 1000 qmm mit 1250 Ampere. Ähnliche Belastungstabellen sind neuerdings auch für die Zwei- und Dreileiterkabel aufgestellt worden, alle diese Tabellen zeigen die Tendenz einer immer stärkeren Beanspruchung des Materials in bezug auf die zulässige Erwärmung gegenüber früher, und damit verbilligen sich naturgemäß entsprechend die Anlagen.

Die gute Ableitung der Wärme wird also besonders gewährleistet, wenn die Kabel direkt in die Erde verlegt werden. Das ist auch sehr vielfach üblich. Dagegen spricht nur die Notwendigkeit, im Falle von Durchschlägen oder Neuverlegungen die Straßen aufzureißen. Man vermeidet dies für alle Verkehrsstraßen größerer Bedeutung dadurch, daß man in ihnen von vornherein Betonröhren oder dergleichen verlegt, in welche die Kabel nach Bedarf aus- und eingezogen werden können.

Die Sicherheitsvorschriften des Verbandes deutscher Elektrotechniker, die auch schon bei der Darstellung der Maschinen vielfach genannt worden sind, be-

schäftigen sich in ausgedehntem Maße mit den Verteilungsleitungen, besonders den Freileitungen. Für diese sind ja eben auch die drohenden Gefahren: Blitz, Sturm und Tiere, am zahlreichsten. Es ist natürlich nicht die Aufgabe dieser Darstellung, diese Vorschriften im einzelnen aufzuzählen, doch interessiert es auch den Fernerstehenden, von welch hoher wirtschaftlicher Bedeutung derartige Vorschriften sein können. Es heißt da z. B.: wenn eine Hochspannungsleitung über Ortschaften, bewohnte Grundstücke und gewerbliche Anlagen geführt wird, oder wenn sie sich einem Verkehrswege so weit nähert, daß die Vorüberkommenden durch Drahtbrüche gefährdet werden können, müssen die Leitungsdrähte entweder so hoch angebracht sein, daß im Falle eines Drahtbruches die herabhängenden Enden mindestens 3 m vom Erdboden entfernt sind, oder es müssen Vorrichtungen angebracht werden, welche das Herabfallen der Leitungen verhindern, oder solche, welche die herabfallenden Teile selbst spannungslos machen, oder es müssen innerhalb der fraglichen Strecke alle Teile der Leitungsanlage mit entsprechend erhöhter Sicherheit ausgeführt werden.

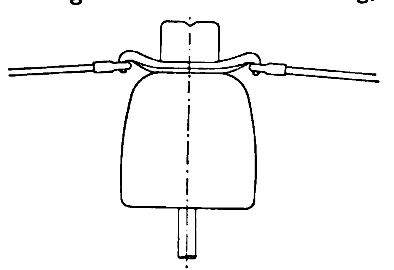


Abbildung 199. Veraltete Sicherheitsaufhängung.

Gerade die Verlegung längs der Landstraßen wird nun einmal die Montage erleichtern und verbilligen, anderseits die Überwachung erleichtern. Sie zu vermeiden, wird in anderen Fällen große Umwege für die Leitungsführung bedeuten. Der Umstand, daß diese und ähnliche Vorschriften in der Schweiz nicht so streng gefaßt sind, bringt es dann mit sich, daß von einer Zentrale wie Reinfelden aus elektrische Energie mit wirtschaftlichem Vorteil auf weitere Strecken auf Schweizer Gebiet geleitet werden kann als auf deutschem. In Amerika, wo es allgemeine Vorschriften nach deutschem Muster überhaupt noch nicht gibt, ist es ebenfalls möglich, weitere Strecken elektrisch mit wirtschaftlichem Vorteil zu überbrücken, als dies in Deutschland möglich sein würde. Die oben angeführte Vorschrift hat auch eine Konstruktion nach Abbildung 199 entstehen lassen, die in einfachster Weise die Forderung zu erfüllen scheint, daß bei Bruch Hochspannungsleitungen stromlos werden: die zerrissene Leitung fällt einfach an beiden Enden von den haltenden Isolatoren ab. Als aber diese Konstruktion im Verteilungsnetz der Zentrale Berggeist angewandt wurde, ergab es sich, daß die vielen losen Verbindungsstellen mit der Zeit außerordentlich hohe Widerstände zeigten; sie wurden bei heftigem Winde gelockert, es entstanden dann kleine Lichtbogen, und der Kontakt verschlechterte sich mehr und mehr: das Leitungsnetz war unter Aufwendung bedeutender Kosten umzubauen.

Es soll damit nicht gesagt sein, daß die deutschen Verbandsvorschriften über das Ziel hinausschössen; sicherlich ist dies aber in der Vergangenheit in manchen Fällen geschehen, z. B. durch Vorschriften, welche die Bahn- und Postbehörden zur vermeintlichen Sicherung ihrer Betriebe geben zu müssen glaubten. Von manchen Eisenbahndirektionen wurde früher verboten, Eisenbahngleise mit Hochspannungsfreileitungen zu überschreiten, es wurden vielmehr Kabelunterführungen gefordert. Dadurch wurden die Elektrizitätsgesellschaften genötigt, eine Menge schwacher Stellen in ihr Netz einzubauen, denn das sind, wie oben dargelegt, Übergangsstellen von Freileitungen zu Kabeln mit ihren Kabelendverschlüssen im Freien jederzeit. Es zeigte sich aber ferner, daß gerade an diesen Stellen atmosphärische Entladungen sich nach dem Erdboden zu auszugleichen suchen, d. h. daß die dort angebrachten Blitzschutz-

vorrichtungen, also in unmittelbarer Nähe des Bahngleises, häufig ansprachen. Dabei wurden die bahnamtlichen Signalvorrichtungen durch irgendwelche induzierten Spannungen in Tätigkeit gesetzt, eine Gefahr, die sich bei einfacher Überführung der Bahn mit Hochspannung nicht bemerkbar gemacht hat. Auch die Forderung der Postverwaltung, daß Telephon- und Telegraphenbetrieb durch die hochgespannten Starkstromleitungen nicht gestört werden, hat in früherer Zeit zu manchen wirtschaftlich ungünstigen Leitungsführungen Veranlassung gegeben. Auf diesem Gebiete sind aber heute auch noch nicht die Untersuchungen abgeschlossen, und daher ist für den Einzelfall das notwendige Mindestmaß an Vorsichtsmaßregeln noch kaum bestimmbar.

DIE INSTALLATIONSTECHNIK. Wer den Stand der heutigen Starkstromtechnik kennen lernen will, soweit sie der Beleuchtung und der Kraft dient, wird auch einen Überblick zu gewinnen suchen über das sehr ausgedehnte Gebiet der Installationstechnik, d. h. der Leitungen, Sicherungen, Schalter usw., mit denen Lampen und Motoren an das soeben besprochene Verteilungsnetz angeschlossen werden, durch das sie die elektrische Energie der Dynamos der Zentralen zugeführt erhalten. Er wird aber auch hier nach den augenblicklich wirkenden Prinzipien fragen und nach den Schwierigkeiten, die sich in diesem Teile der Elektrotechnik zeigen. Hier soll der Begriff noch etwas weiter gefaßt und ein Überblick über das Verwendungsgebiet des elektrischen Lichts und elektrischen Antriebs damit verknüpft werden.

Die Leitungen. Für die meisten Installationen wird heute sogenannter Gummiaderdraht (G. A. Draht) verwandt. Diese Leitungen werden nach den Vorschriften des Verbandes deutscher Elektrotechniker folgendermaßen hergestellt:

Die Kupferseele ist feuerverzinnt, mit einer wasserdichten vulkanisierten Gummihülle umgeben und mit gummiertem Band umwickelt. Hierüber befindet sich eine Umklöpplung aus Baumwolle, Hanf oder gleichwertigem Material, welche in geeigneter Weise imprägniert ist. Bei Mehrfachleitungen kann die Umklöpplung gemeinsam sein.

Die Zusammensetzung der Gummimischung für Normalleitungen ist wie folgt festgesetzt:

33,3 % Kautschuk, welcher nicht mehr als 4 % Harz enthalten soll,
67,7 % Zusatzstoffe, einschließlich Schwefel.

Die Gummiader wird geradeso nahtlos um die verzinnten Kupferleiter gepreßt wie das Blei um die Kabel. Die zunächst auffallende Vorschrift, daß nur ein so geringer Gummigehalt normal verwendet werden soll, erklärt sich dadurch, daß reines Gummi bei längerem Liegen zu viel Wasser, bis zu 25 %, aufnehmen würde. Für Isolationszwecke eignen sich daher nur Mischungen, deren Gummigehalt zwischen 25 und 50 % liegen muß, die aber im übrigen aus sogenannten Beschwerungsmitteln, z. B. Schwerspat, Gips, Schlämmkreide, Ceresin u. dgl. m., bestehen müssen.

Auch bei Gummiaderdrähten kann die Kupferseele entweder aus einem Draht, etwa bis 16 qmm, oder aus mehreren Drähten, z. B. 7 oder von 35 qmm an aus 19 Drähten (maximaler Querschnitt 1000 qmm) oder schließlich aus sehr vielen bestehen zur Erzielung möglichster Biegsamkeit, wenn es sich darum handelt, tragbare Beleuchtungskörper oder fahrbare Motoren anzuschließen. Gerade diese flexibeln Leitungen erfordern erhöhte Aufmerksamkeit bei ihrer Herstellung.

Nur noch selten werden heute Gummibandleitungen benutzt, die noch vor einer Reihe von Jahren das Hauptleitungsmaterial bei allen Installationen bildeten, sie dürfen wegen ihrer viel größeren Neigung, durch Feuchtigkeit ihre Isolation zu verlieren, nur noch zur festen, einfachen Verlegung über Putz in trockenen Räumen

für Spannungen bis 125 Volt benutzt werden. Sie sind nach den Vorschriften des Verbandes deutscher Elektrotechniker mit massiven Leitern in Querschnitten von 1 bis 16 qmm, mit mehrdrähtigen Leitern in Querschnitten von 1 bis 150 qmm zulässig, dürfen jedoch als Mehrfachleitung nicht benutzt werden. Die Kupferseele ist feuerverzinnt, mit Baumwolle umgeben und darüber mit unverfälschtem, technisch reinem unvulkanisiertem Paraband umwickelt. Die Überlappung der Umwicklung muß mindestens 2 mm betragen. Über der Parabandhülle befindet sich eine Umwicklung mit Baumwolle und über dieser eine Umklöpplung aus Baumwolle, Hanf oder gleichwertigem Material, welches in geeigneter Weise imprägniert ist.

Außer diesen normalen Installationsdrähten finden sich einmal eine Reihe von solchen, die gegen Einflüsse von Feuchtigkeit, Säuredämpfen u. dgl. besonders unempfindlich sein sollen; zu diesen gehört der Hackethaldraht, dessen Oberfläche mit einer Mennigemischung imprägniert und der daher besonders wetterbeständig ist. Anderseits liegt zuweilen das Bestreben vor, den Draht noch mechanisch besonders zu schützen, etwa durch eine Bewehrung mit feinem Eisendraht, z. B. bei flexibeln Drähten, die in einer Werkstatt einen fahrbaren Motor anschließen sollen oder dergleichen.

Meist wird freilich der mechanische Schutz der Leitungen durch die Art der Verlegung erreicht. Ihre Hauptarten sind:

1. Zwei verdrillte Leitungen, die den Strom zur Verbrauchsstelle hin- und zurückführen, werden gemeinschaftlich auf einer einzigen Reihe von Porzellanknöpfen — Porzellanrollen genannt — verlegt; man bezeichnet diese Art der Leitungsführung als Peschelsystem. Hierfür ist also heute nur noch G. A. Draht gestattet.

2. Es werden gerade G. A. Drähte auf zwei Reihen Rollen, je eine für Hin- und Rückleitung, verlegt, dies geschieht besonders in feuchten Räumen.

3. Für Hin- und Rückleitung werden G. A. Drähte unter Putz in eines der verschiedenen Rohrsysteme immer zu zweien eingezogen. Eingeführt wurde diese Art der Verlegung von den Bergmann-Elektrizitäts-Werken, man spricht daher von „Bergmannrohr". In ein Papierrohr, das außen mit Messing oder verzinntem Eisenblech umkleidet sein kann, wird nachträglich der Leitungsdraht eingezogen, ja, er muß auch jederzeit wieder ausgezogen und durch einen anderen ersetzt werden können.

Das Rohrsystem wurde nach den verschiedensten Richtungen hin ausgebaut: verbleites Eisenrohr ohne Papierisolation im Innern oder Stahlrohr wird verwandt, dieses Rohr selbst kann dann bei genügender metallischer Verbindung der einzelnen Rohre als Leiter benutzt werden, wenn ein Draht betriebsmäßig mit der Erde leitend verbunden werden darf. Das ist aber tatsächlich bei drei Leitersystemen der Fall, wo der Nulleiter geerdet sein soll.

Der Vorzug der Rohrsysteme liegt außer in dem mechanischen Schutz in dem ästhetischen Vorteil, daß alle Drahtleitungen aus den Zimmern verschwinden, ihr Nachteil darin, daß sich bei Temperaturschwankungen Wasser in den Rohren kondensiert und die Isolation schädigt.

Das Peschelrohrsystem soll dies dadurch vermeiden, daß es aus geschlitzten Längen emaillierten Stahlrohres besteht. Das Kondenswasser soll durch die Schlitze in das Mauerwerk versickern, bei feuchten Mauern kann aber bei seiner Verwendung umgekehrt Wasser aus den Mauern in die Rohre eintreten.

Vielfach kehrt man daher neuerdings wieder zur Verlegung über Putz zurück und benutzt in Räumen, in denen die Leitungen leicht mechanischen Beschädigungen ausgesetzt sind, in denen aber aus ästhetischen Gründen die Verlegung auf Porzellan-

rollen vermieden werden soll, das weniger auffällige System Kuhlo. Nach diesem werden Hin- und Rückleitung zunächst einzeln mit Gummi umpreßt, dann aber nochmals zusammen mit Gummi und Faserstoffen isoliert und mit einem gefalzten dünnen Mantel aus Messingblech versehen. Dadurch sind die Leitungen sowohl gegen Feuchtigkeit wie mechanische Beschädigung geschützt, es kann über sie hinweg tapeziert werden usw., doch steht die Verlegungsart der ganz unter Putz ästhetisch natürlich nach.



Abbild. 200. Sicherungselement der Siemens-Schuckert-Werke, Berlin.

Bei der Ausbildung dieser verschiedenen Systeme sind die weiteren Fragen, die ihre Entwicklung bestimmen, außer ihrem Preis und der Bequemlichkeit der Installation, vor allem die Art der Verzweigung der Leitung (die „Abzweigdosen") und die Art der Krümmungen in den Leitungen.

Die Frage nach der besten Installationsleitung und ihrer Verlegung ist für alle praktisch vorkommenden Fälle durchaus noch nicht so genau geklärt, daß man nicht zuweilen die unangenehmsten Überraschungen erleben könnte.

Die Sicherungen der Hausinstallationen haben noch weitere Forderungen zu erfüllen als diejenigen in Zentralen oder Betriebsräumen, die nur von sachverständigem Personal betreten werden. Außer dem sicheren Durchbrennen bei mehr als dem $1^1/_4$fachen Normalstrom, aber auch bei direkten Kurzschlüssen, und der Auswechselbarkeit unter Spannung kommen für Installationssicherungen als weitere Forderungen hinzu: Es muß unmöglich sein, eine durchgebrannte Sicherung durch eine für höhere Stromstärke zu ersetzen, desgleichen in einer Anlage von 440 Volt Sicherungen für 220 Volt zu benutzen, d. h. es wird Unverwechselbarkeit der Sicherungen für Strom und Spannung gefordert. Es soll unmöglich sein, die blanken, unter Spannung stehenden Kontakte zu berühren. Das Durchbrennen soll in einem feuersicher abgeschlossenem Raume vor sich gehen.

Diese Forderungen erfüllen die sogenannten Patronensicherungen, bei denen der Schmelzdraht in eine Porzellankammer (Patrone) vollständig eingeschlossen ist. Bei Anwendung dieses Systems ergeben sich aber sofort die weiteren Anforderungen, daß diese Patronen selbst bei Kurzschluß dem Druck der sich entwickelnden Gase und der erwärmten Luft Widerstand leisten sollen, daß eine Patrone, in deren Innern der Schmelzdraht durchgebrannt ist, außen dies selbsttätig anzeigt und daß die Stärke des Drahtes oder seine Schmelzstromstärke an der Patrone äußerlich leicht zu ersehen ist. Ferner soll der nach dem Durchbrennen der Sicherung auszuwechselnde Teil möglichst billig sein. Konstruktiv sind sie endlich so auszubilden, daß die Patronen leicht ausgewechselt und die Sicherungselemente auf Tafeln zusammenmontiert werden können, denn auch bei Sicherungen erleichtert die Zentralisation die Übersicht und die Bedienung.



Abbildung 201. Paßschrank für Sicherungspatronen der Siemens-Schuckert-Werke.

Alle diese mannigfaltigen Forderungen werden durch die Patronensicherungen mit geteilter Patrone heutigestags erfüllt. Abbildung 200 stellt die neueren Sicherungen

der Siemens-Schuckert-Werke dar, die zuerst mit dem Patronensystem seinerzeit an die Öffentlichkeit traten. In einem offenen Porzellansockel, dem Sicherungselement, ist auf dem Grunde der eine stromführende Kontakt angebracht, während der zweite durch ein Metallgewinde auf der inneren Mantelfläche gebildet wird. Auf den ersten Kontakt ist — aber nur mit einem besonderen Werkzeug — ein Kontaktzwischenstück oder die „Paßschraube" aufschraubbar, welche die Unverwechselbarkeit für verschiedene Stromstärken gewährleistet. Sie besteht nämlich aus Isoliermaterial bis auf eine mittlere metallische Vertiefung, in die erst die Zapfen der eigentlichen Patronen passen. Diese Zapfen haben einen steigenden Durchmesser mit steigender Stromstärke, so daß wohl eine Patrone für geringere in ein Sicherungselement für höhere Stromstärke eingesetzt werden kann, aber nicht umgekehrt. Die Unverwechselbarkeit für verschiedene Spannungen wird durch verschiedene Längen der Sicherungselemente sowohl wie der Patronen erreicht. Man beschränkt sich aber meist nur auf zwei Spannungen, 250 und 500 Volt. Die metallische Verbindung des Stromkreises erreicht man erst durch Aufschrauben des Sicherungsdeckels (Abbildung 203), der nun alle metallischen Teile nach außen vollständig abschließt. Daß eine Sicherungspatrone durchgebrannt ist, wird dadurch kenntlich gemacht, daß ein Stückchen gefärbten Papiers durch den Druck im Innern der Patrone herausgeschleudert wird; das ist durch ein Glimmerfenster in dem eben genannten Deckel zu beobachten. Die Farbe dieses Papiers ist je nach der Stromstärke, für die die Patrone gebaut ist, verschieden gefärbt, und zwar sind in recht zweckmäßiger Weise die Farben der Briefmarken soweit wie möglich gewählt: eine Patrone mit rotem Papierstückchen ist für einen Stromkreis von normal 10 Ampere bestimmt usw. Die ganzen Elemente lassen sich in der einfachsten Weise sowohl für zwei wie auch für drei Leiteranlagen auf Tafeln vereinigen.



Abbildung 202. Sicherungspatronen für 500 und 250 Volt der Siemens-Schuckert-Werke.

Eine offene Frage ist es noch, ob man versuchen soll, die Patronen auch so durchzubilden, daß sie von den herstellenden Fabriken auch repariert werden können gegen einen geringeren Preis, als für die neue anzulegen ist. Vielfach sind mit reparierten Patronen schlechte Erfahrungen gemacht worden.



Abbildung 203. Sicherungsdeckel mit Edisongewinde.

Die Installations- oder Dosenschalter. Der unscheinbare kleine Apparat, den der moderne Mensch so oft betätigt, ist komplizierter, er hat mehr Forderungen zu erfüllen, als man auf den ersten Blick annehmen würde, soll er allen technischen Ansprüchen genügen. Schon seine Verwendung ist mannigfach, er kommt als einpoliger Ausschalter, als doppelpoliger Ausschalter, als gleichzeitiger Um- und Ausschalter, als Wechselschalter und als Ausschalter, der von zwei verschiedenen Stellen dieselbe Lampe ein- und ausschaltet, vor und noch in einer Reihe von anderen Ausführungen.

Die Forderungen, die man an ihn in irgendeiner seiner Formen stellt, sind:

Er soll dauernd sicher gut funktionieren, d. h. es soll nie ein Lichtbogen stehenbleiben können. Dazu soll er momentan den entstehenden Funken oder Lichtbogen unabhängig von der Art des Drehens abreißen, d. h. er soll ein Momentausschalter sein. Bei früheren Schaltern konnte man die Kontakte in beliebiger Entfernung stehen lassen oder sie nur ganz langsam voneinander entfernen, der auftretende Lichtbogen vernichtete dann die Kontakte. Der Dosenschalter soll ferner auch bei 25% erhöhter Spannung noch funktionieren, er soll nicht wärmer als schmelzendes Wachs werden. Seine Isolation soll noch für eine Wechselspannung von 1000 Volt genügend sein. Drehen des Schalters in der verkehrten Richtung soll nur den Handgriff, nicht aber die Kontaktfedern bewegen, daher dem Schalter nichts schaden. Seine Konstruktion soll nach den Prinzipien der Massenfabrikation (d. h. besonders für Stanzen, Drücken und automatisches Drehen) erfolgen; er soll möglichst für verschiedene der vorher genannten Verlegungsarten gleichzeitig geeignet sein, desgleichen für möglichst viele der obengenannten Schaltungsarten. Ein einziger Schalter z. B. kann mit vier Kontakten je nach der Art der Kontaktfeder und der Anschlüsse für jede der Schaltungen der Abbildung 204a, c bis d verwendet werden, wogegen ein Schalter mit drei Stellungen (Abbildung 204b) nicht vielseitig benutzt werden kann. Der Schalter soll schließlich möglichst rasch montiert werden können.

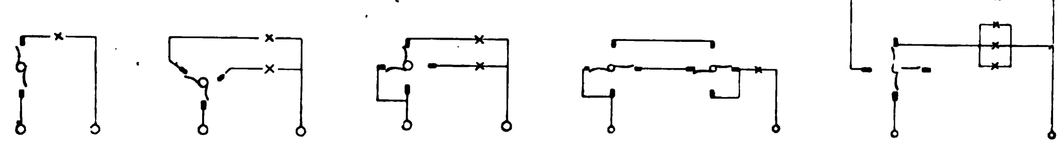
Die konstruktive Lösung dieser Forderungen ist auf die mannigfaltigste Weise erreicht worden, doch würde die genauere Beschreibung dieses oder jenes Schalters, der doch in der kürzesten Zeit wieder veraltet sein kann, nicht im Sinne der Aufgabe dieses Buches sein.

Mit den Schaltern und den Steckdosen, durch die flexible Leitungen für transportable Beleuchtungskörper angeschlossen werden, den Fassungen und Armaturen für die Glüh- und Bogenlampen ist das normale Installationsmaterial in der Hauptsache genannt.

Denn bei gewöhnlichen Hausinstallationen geht die Stromzuführung vom Hausanschluß, einem Kasten mit einer Hauptsicherung, der unter der Kontrolle des Elektrizitätswerkes steht, zum Zähler, von hier zur Verteilungstafel mit den Sicherungselementen oder den verschiedenen in jedem Stockwerk angebrachten Tafeln. Die senkrechten „Steigleitungen“ stellen die Verbindung mit dem Hausanschluß her. Von den Sicherungen geht der Strom durch die Schalter der einzelnen Zimmer zu den Beleuchtungskörpern, den elektrischen Aufzügen, den Ventilatoren oder den häuslichen Kleinmotoren. Diese können bis heute ja noch ein Luxusartikel genannt werden, auch sie werden sich aber mit Sicherheit im Laufe der nächsten Jahre zu einem unentbehrlichen Gebrauchsgegenstand entwickeln.

Im allgemeinen sind die Entwicklungsrichtungen der modernen Hausinstallation schon bei der Besprechung der Installationsmaterialien genannt worden. Verbesserungen werden erstrebt, ohne daß am jetzigen Zustand direkt technische Fehler nachzuweisen wären. Bei größeren Gebäuden besonders mit eigenen Zentralen dagegen ist die Installationstechnik bisweilen heute nicht auf der Höhe, die sie nach dem Stande der Fabrikation und der Ingenieurausbildung haben könnte. Die Schuld daran liegt nicht sowohl an dem Elektroingenieur, der das Projekt ausarbeitet, als an dem geringen Verständnis, das manche Architekten noch für die Bedürfnisse und Anforderungen der Elektrotechnik haben. Außerdem ist für die Ausführung der Installation mehr als der Ingenieur der Monteur verantwortlich, der im Kampfe mit Wasser-, Gas- und anderen Leitungen die Installation nicht so ausführen kann, wie sie auf dem

Papier zunächst gedacht war. Anforderungen bei jeder größeren Installation sind neben Betriebssicherheit und Billigkeit die Übersichtlichkeit, leichte Reparierbarkeit und die Möglichkeit einer Erweiterung, ohne daß die alten Leitungen fortwährend



Abbild. 204a. Einpoliger Ausschalter. Abbild. 204b. Einpoliger Umschalter, eine Nullstellung. Abbild. 204c. Dasselbe, aber zwei Nullstellungen. Abbild. 204d. Schaltung von zwei Stellen aus. Abbild. 204e. Wechselschalter für 1, 3 oder 4 Lampen.

gekreuzt und unzugänglich gemacht werden. Dagegen wird aber häufig gefehlt, solange die Architekten oft nur der billigsten Offerte den Zuschlag erteilen und solange sie in den meisten Fällen die eingereichten Projekte der verschiedenen Installationsfirmen nicht daraufhin prüfen können, ob sie sich gegenseitig stören, sondern die Monteure untereinander die Leitungsführung ausmachen.

Die elektrischen Aufzüge müssen sowohl für Gleich-, Wechsel- wie Drehstrom hergestellt werden. Da sie ein hohes Anlaufsmoment des Antriebsmotors erfordern, aber bei der Fahrt eine konstante Tourenzahl, so sind sie bei Gleichstrom sowohl mit Haupt- wie mit Nebenschlußmotoren ausgerüstet worden. Bei Drehstrom kommt natürlich nur der asynchrone Drehstrommotor in Betracht. Bei Einphasenstrom hat man früher auch bisweilen den asynchronen Motor benutzt, dieser mußte aber, da er kein Anzugsmoment besitzt, dauernd laufen und wurde mechanisch nach Bedarf mit der Seiltrommel in dem einen oder anderen Sinne gekuppelt. Das ist ungünstig, da die Aufgaben der Steuerung dann auf mechanischem und nicht elektrischem Wege gelöst werden müssen. Der zweite Weg aber ist einfacher, billiger und sicherer. Deshalb hat der Wechselstrom-Kommutatormotor außer im Bahnbetriebe zuerst in der Technik der Aufzüge und Kräne Verwendung gefunden. Die Ansprüche, die man an die Regulierung von Aufzügen stellt, sind so mannigfaltiger Art, daß es eines besonderen Werkes bedürfte, um den Stand der augenblicklichen Technik auf diesem Gebiete für den Fernstehenden auch nur einigermaßen zu skizzieren. Es sind dabei zum großen Teil mechanische Probleme, die auf so verschiedene Weise gelöst werden können, daß sehr bald die Darstellung veraltet sein würde. Zu den Ansprüchen, die man an einen Aufzug heute stellt, gehört: er soll automatisch sich aus- und einschalten, sobald man an dem Steuerseil zieht, oder einen Hebel dreht, oder auf einen Druckknopf drückt. Ferner soll er, wenn möglich, an einer vorher zu bestimmenden Stelle anhalten. Unter allen Umständen soll er an den Enden seines Hubes automatisch ausgeschaltet werden. Seine Geschwindigkeit soll nicht über ein bestimmtes Maß hinaus zunehmen und im Falle eines Seilbruches neben der mechanischen Feststellung des Fahrkorbes auch der Motor stillgesetzt werden. Die Steuerung muß so einfach zu bedienen sein, daß sie ungelernten jugendlichen Arbeitern übertragen werden kann; ja, es gibt heutigestags Systeme, bei denen jeder Benutzer des Fahrstuhls ihn durch Drücken eines Knopfes zu der Etage heranholen kann, auf der er sich befindet. Während dieser Zeit muß dann die Betätigung des Fahrstuhls von einer anderen Etage ausgeschlossen sein. Ebenso wird verlangt, daß alle Schachttüren nur geöffnet werden können, wenn der Fahrstuhl sich vor ihnen befindet, oder umgekehrt, daß der Motor nicht angelassen werden kann, solange eine Tür noch offen

steht u. a. m. Der elektrische Betrieb ist weit mehr als jeder andere zur Erfüllung aller dieser Aufgaben berufen, da durch Relais, Schalter und Sicherungen und ihre Kombination eine so vielseitige, leichte und sichere Regulierung und Abschaltung des Motors wie bei keinem anderen Betriebe möglich ist.

Bei dem verwandten Gebiete des elektrischen Antriebs von Kranen ist vielfach auch die zu benutzende Stromart gegeben. Bei größeren Anlagen, z. B. im Hafenbetrieb, wird man dagegen besonders zu untersuchen haben, ob man Gleichstrom oder Drehstrom vorziehen soll, einfacher Wechselstrom scheidet selbstverständlich aus. Wegen des hohen Anlaufmomentes wird von vielen Firmen unbedingt dem Gleichstrom der Vorzug gegeben, nur von einigen wird der fehlende Kommutator und die Transformierbarkeit bei weitverzweigten Anlagen für den Drehstrom ins Feld geführt. Meist wird aber der Vorteil des Gleichstroms, allein durch zwei Leitungen die Energiezuführung bewirken zu können und die Möglichkeit, alle Stromstöße durch Unterstützung einer Akkumulatorenbatterie ausgleichen zu können, für die Wahl des Gleichstroms ausschlaggebend sein. Der elektrische Betrieb der Hebezeuge hat nur noch, wenn es sich um einfaches Heben und Senken von Lasten handelt, in dem hydraulichen Kran einen ebenbürtigen Nebenbuhler, überall, wo es sich gleichzeitig um horizontale Verschiebungen und um Drehung handelt, wird heute der Elektromotor im Vorteil sein.

Einzel- oder Gruppenantrieb. Geht man heute an die Frage der Energieübertragung in Werkstätten heran, so wird man nicht im Zweifel sein, daß die Aufstellung einer zentralen Kraftanlage und die elektrische Verteilung zu den einzelnen Werkstätten der Errichtung von einzelnen Dampfmaschinenanlagen, wie das noch vor etwa zwanzig Jahren die Regel war, oder gar weitläufigen Transmissionen oder Seilübertragungen vorzuziehen ist. Dagegen wird auch heute noch in manchen Betrieben die Frage offen sein, ob Einzelantrieb der Arbeitsmaschinen oder der in Gruppen vorzuziehen ist. Der Gruppenantrieb ist in der Anschaffung meist billiger, bei sehr kleinen Arbeitsmaschinen ist der Wirkungsgrad des einen großen Motors sicherlich besser als der der vielen kleinen. Aber schon hier ist die Frage aufzuwerfen, ob die einzelnen Arbeitsmaschinen nicht so oft ein- und ausgeschaltet werden müssen, daß ein großer Teil der Arbeit des großen Motors für nutzlosen Leerlauf der Transmissionen geleistet werden muß, während bei Einzelantrieb zum Stillsetzen der Arbeitsmaschinen eben der Motor selbst abgeschaltet wird.

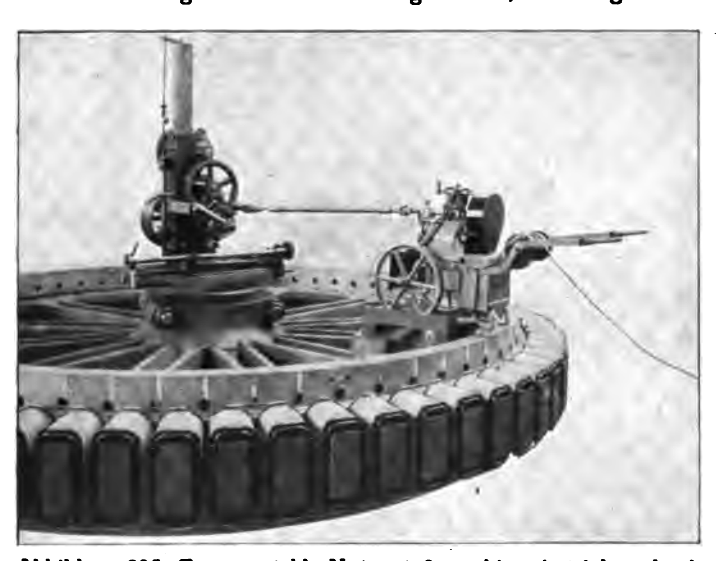


Abbildung 205. Transportable Nutenstoßmaschine, betrieben durch transportablen Elektromotor der Oerlikon-Elektrizitäts-A.-G.

Ist Gleichstrom vorhanden, so sind bei Einzelantrieb viel mehr einzelne Kommutatoren in Ordnung zu halten als bei Gruppenantrieb. Dagegen fallen bei Einzel-

antrieb die für manche Arbeitsbetriebe sehr störenden Transmissionen fort. Wenn man z. B. für Holzbearbeitungswerkstätten bei Gruppenantrieb die Transmissionen schon in einen besonders vorzusehenden Keller legt und die Maschinen mit Riemen durch die Decke hindurch von unten antreiben läßt, so können mit denselben Kosten vielleicht auch einzelne Motoren beschafft werden. Es kann ferner leichter bei Einzelantrieb mit dieser oder jener Maschine in Überstunden weitergearbeitet werden. Der Gang für jede Maschine ist ruhiger, da das Ein- und Ausschalten der anderen Arbeitsmaschinen Stöße in der Transmission bei Gruppenantrieb bisweilen hervorruft. So zeigte sich, daß bei elektrischem Gruppenantrieb in Webereien schon der Faden etwas seltener riß als bei mechanischem, oder man konnte zu etwas höheren Geschwindigkeiten übergehen, aber dieses günstige Verhalten steigerte sich noch bei Einzelantrieb. Verbindet man die Arbeitsmaschine direkt mit dem Elektromotor, so wird sie ferner transportabel, da jener überall leicht anzuschließen ist. Dieser Vorteil des Einzelantriebs wird besonders in Maschinenfabriken bei Bearbeitung großer Werkstücke nutzbar gemacht. Nicht nur, daß man sich kleiner elektrisch betriebener Handbohrmaschinen oder fahrbarer bedient, auch größere Bohr-, Stoß- und Fräsmaschinen werden mit Elektromotoren versehen, dadurch transportabel gemacht und mit dem Kran zu dem zu bearbeitenden Werkstück hingebracht, das vielleicht so schwer ist, daß ein Ausrichten auf einer Arbeitsmaschine überhaupt ausgeschlossen wäre. Gerade zur Bearbeitung großer Drehstromdynamos für langsame Tourenzahlen sind heute derartige elektrisch angetriebene Werkzeugmaschinen unbedingt erforderlich.

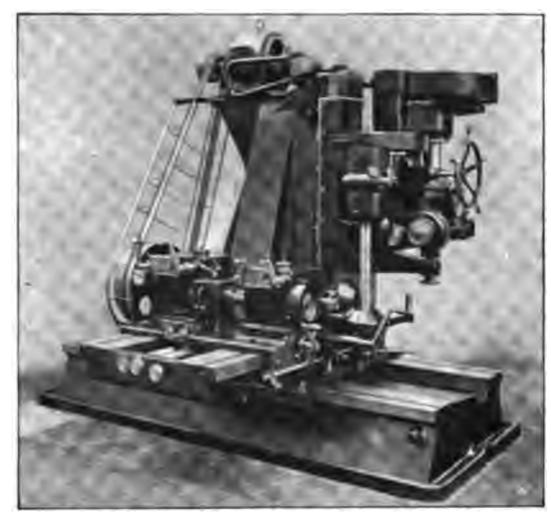


Abbildung 206. Elektrisch angetriebene transportable Fräsmaschine für die Bearbeitung großer Dynamomaschinen. System und Ausführung von Reinecker, Chemnitz.

Der heutige Stand des elektrischen Werkstattantriebes ist daher der: Gruppenantrieb für alle Fälle, wo eine größere Anzahl kleiner verschiedener Arbeitsmaschinen mit wenig Ruhepausen gleich lange zu arbeiten hat, Einzelantrieb für alle großen, alle häufig stillzusetzenden und transportablen Maschinen, desgleichen, wenn höchste Gleichförmigkeit wie in der Textilindustrie oder das Fehlen jeder Transmission das zu erstrebende Ziel ist.

Die Elektrizität im Bergwerksbetriebe. Ihre Anwendung auf diesem Gebiete erstreckt sich einmal auf die Beleuchtung der ober- und unterirdischen Anlagen, auch die eigentliche Bergmannslampe hat man, freilich noch mit wenig Erfolg, durch eine transportable elektrische Lampe zu ersetzen versucht, die von Akkumulatoren gespeist wird. Der Signal- und Sicherheitsdienst wird zum großen Teil durch elektrische Apparate versehen, für die Minenzündung wird sie zu Hilfe gerufen. Hier wollen wir uns aber darauf beschränken, auf ihr Eindringen in die eigentliche Energieübertragung zur Leistung mechanischer Arbeiten etwas näher einzugehen. Einerseits war es die elektrische Grubenbahn, die frühzeitig Eingang fand und heute sowohl mit Gleich- wie mit einphasigem Wechselstrom (vgl. Abbildungen 108 bis 110) betrieben

wird, ferner die elektrische Gesteinbohrmaschine, dann aber war es die Frage der Wasserhaltung, welche den Übergang zu einem rein elektrischen Betriebe einer Grube zuerst nahelegte. Bis zum Anfang der neunziger Jahre des vorigen Jahrhunderts wurden die Wasserhaltungspumpen, die das sich auf dem Grund der Grube sammelnde Wasser in Deutschland meist auf eine Höhe von 400—500 m, ja bis 700 m, also unter einem Druck von etwa 40—70 Atmosphären, heraufzupumpen haben, entweder mit Dampf betrieben, der aus Kesselanlagen über Tage zugeleitet wurde, oder nach dem früher an manchen Stellen eingeführten Kaselowskischen Patent mit Preßwasser unter dem ungeheuren Druck von 100—200 Atmosphären. Daß beides ein technischer Notbehelf war, liegt klar zutage, denn in beiden Fällen waren die Energieverluste außerordentlich groß, die Betriebssicherheit mäßig, die Montage schwierig, die dauernden Kosten, auch an Reparaturen, hoch. Der Vorzug elektrischer Wasserhaltung trat direkt zutage: Sichere Führung der Energie in Kabeln, leichte Regulierfähigkeit, sicheres Arbeiten auch bei forciertem Betriebe, geringe Reparaturkosten. Da jede Gefahr von Schlagwettern vermieden werden soll, ist der Drehstrommotor mit Kurzschlußanker derjenige Motor, der an erster Stelle in Betracht kommt. Für solche gewaltigen Leistungen, wie sie hier in Betracht kamen, waren aber Motoren mit Kurzschlußankern bisher nicht ausgeführt worden. Die erste von Lahmeyer (Frankfurt a. M.) hergestellte elektrische Wasserhaltungsmaschine, die auf der Zeche „Zollverein" aufgestellt wurde, besaß z. B. eine Leistung von 350 P.S. Der Motor durfte zum Antrieb der Pumpe nur 60 Umdrehungen pro Minute haben und mußte daher mit 50 Polen (vgl. S. 273) ausgeführt werden, da die Periodenzahl des benutzten Drehstroms nur 25 pro Sekunde oder 1500 pro Minute war, und erhielt einen Durchmesser des Magnetgestells von 4,5 m. Die Pumpe war eine einfache Kolbenpumpe, die direkt durch Schubstangen und Kurbelgetriebe von dem Drehstrommotor angetrieben wurde. Die Ingangsetzung wurde dadurch bewerkstelligt, daß über Tage eine besondere Dynamo mit Dampfmaschinenantrieb aufgestellt wurde, die zusammen mit dem Drehstrommotor in Betrieb gesetzt wurde. Dann wächst die Spannung langsam mit der Tourenzahl, und auch die Ströme, die in den Stator des Drehstrommotors fließen, bleiben innerhalb zulässiger Grenzen. Auch die Periodenzahl des Wechselstroms ist zunächst infolge der langsamen Drehungen der Dynamo eine geringe, entsprechend auch die Tourenzahl des im Drehstrommotor umlaufenden Drehfeldes. Diesem kann der Rotor mit geringer Schlüpfung folgen. Das Anlassen wurde noch



Abbildung 207. Wasserhaltung mit Kolbenpumpe und langsam laufendem Drehstrommotor mit Schleifringen und Kurzschlußvorrichtung. Ausführung der Siemens-Schuckert-Werke, Berlin.

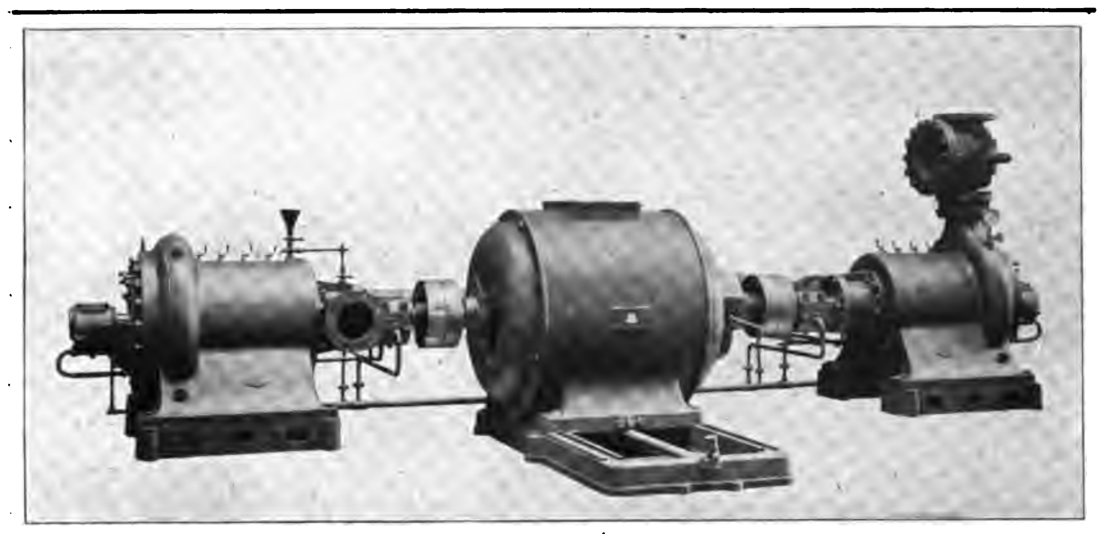


Abbildung 208. Hochdruck-Zentrifugalpumpe für eine minutliche Wassermenge von 5,2 cbm. Zur Überwindung der Förderhöhe von 780 m sind beide Pumpen hintereinandergeschaltet. Der antreibende Drehstrommotor, der zwischen den beiden Pumpen angeordnet ist, leistet maximal 1450 P. S. bei 1490 U. P. M., er ist zur leichteren Revision der Pumpen auf seiner Grundplatte verschiebbar. Ausführung der Maffei-Schwartzkopff-Werke, Berlin.

dadurch unterstützt, daß die Pumpe durch die darüberstehende Wassersäule während dieser Zeit angetrieben wurde und die Drehung des Motors noch unterstützte. Eine Änderung der Tourenzahl der Pumpe und damit ihrer Leistung kann nun in sehr einfacher Weise durch die Änderung der Tourenzahl der Dampfmaschine über Tage erreicht werden, da ja der Drehstrommotor mit geringer Schlüpfung stets folgt. Die Anlage wird dadurch etwas kompliziert, daß noch eine besondere Gleichstrom-Hilfsdynamo notwendig ist. Denn auch bei geringer Tourenzahl soll doch schon eine bestimmte Spannung in der Drehstromdynamo erzeugt werden, dazu müssen aber die Pole der Maschine schon kräftig erregt sein. Eine Gleichstromdynamo, die normalerweise auf derselben Welle wie die Drehstromdynamo montiert ist, besitzt selbst aber bei diesen niedrigen Tourenzahlen noch keine Spannung. Daher ist für das Anlassen der erregende Gleichstrom der besonders aufgestellten und von einer eigenen Dampfmaschine angetriebenen Gleichstrom-Hilfsdynamo zu entnehmen, und auf die gekuppelte Dynamo kann erst bei normaler Tourenzahl umgeschaltet werden. Die Erfahrung, die man mit diesen ersten elektrischen Wasserhaltungen machte, waren durchaus günstig. Ihr Nachteil lag mehr in der Pumpe als im antreibenden Elektromotor, da deren geringe Tourenzahl die großen Dimensionen des Motors erforderlich machte. Maschinen von derartigen Größenverhältnissen in die Grube hinabzubringen und aufzustellen, ist aber natürlich außerordentlich schwierig. Der nächste Fortschritt war der, daß man durch Steuerung der Ventile und Pumpen die Tourenzahl der gewöhnlichen Kolbenpumpen zu erhöhen trachtete, um dadurch Umdrehungszahlen von 150 bis 200 pro Minute zu erreichen. Eine neuere Ausführung einer elektrischen Wasserhaltung mit Kolbenpumpe ersieht man aus Abbildung 207. Jede Pumpe aber, die nur stoßweise die Wassersäule in Bewegung setzt, ist weder für die Wasserförderung selbst, noch für den antreibenden Elektromotor das Erstrebenswerte. Ein großer Vorteil war daher die Konstruktion von Hochdruck-Zentrifugalpumpen, die bei sehr hohen Tourenzahlen von Drehstrommotoren betrieben, der Wassersäule eine gleichmäßige Geschwindigkeit erteilten, also nach einem ähnlichen Grundgedanken, wie in vielen Ventilatoren der Luft Geschwindigkeit und Druck erteilt wird. Nach Überwindung vieler konstruktiver

Schwierigkeiten ist damit die technisch befriedigende Lösung der elektrischen Wasserhaltung gefunden, da Zentrifugalpumpen raschlaufende, also Motoren von verhältnismäßig kleinen Dimensionen erfordern. Gerade die großen Erfahrungen, die man bei der Konstruktion der Turbogeneratoren gemacht hatte, kamen auch der Konstruktion der raschlaufenden Motoren im vollsten Maße zugute. Das zweite große Verwendungsgebiet im Bergbau sind die Ventilatoren, die mit Gleich- oder Drehstrom betrieben werden können, die aber, gerade mit Drehstrom betrieben, besonders geringer Wartung bedürfen. Die elektrische Energieübertragung ist hier noch von besonderem Vorteil, da die Wetterschächte meist in größerer Entfernung von der Grubenzentrale liegen, die elektrische Energie also mittels Freileitungen oder Kabel ohne größere Verluste dorthin übertragen werden kann. Das letzte Gebiet, das sich die Elektrizität im Bergbau eroberte, war das der Förderung, die zunächst wegen der stoßweisen Energieaufnahme große Schwierigkeiten zu bieten schien. Die Anwendung von kompensierten Gleichstrommotoren mit Wendepolen, die von einem Ilgner-Aggregat gespeist werden, sind schon an früherer Stelle erwähnt worden (S. 309). Eine ausgeführte elektrische Förderanlage ersieht man aus Abbildung 209. Eine derartige Anlage übersteigt die Kosten einer Dampfmaschinen-Förderanlage beträchtlich. Weshalb ging man aber doch zu der elektrischen Antriebsart über, wo doch der Dampfmaschinenantrieb direkte technische Mängel nicht zeigte? Der Förderkorb muß meist mit drei verschiedenen Geschwindigkeiten gehoben und gesenkt werden können, einmal zur Kohlenförderung mit etwa 7 m pro Sekunde, dann zur Beförderung von Menschen mit etwa der halben Geschwindigkeit, und schließlich mit ganz geringer Geschwindigkeit von $^1/_{10}$ bis $^2/_{10}$ m pro Sekunde für Seil- und Schachtrevision. Für derart verschiedene Geschwindigkeiten ist nun der elektrische Antrieb besonders geeignet. Der besondere Vorteil dabei ist aber der, daß das Drehmoment eines Elektromotors im Gegensatz zu dem einer Dampfmaschine so gleichförmig ist, daß die Oberbergämter eine höhere Seilgeschwindigkeit für elektrischen als für Dampfmaschinenantrieb zulassen, bis 10 m und mehr pro Sekunde, was natürlich einen großen pekuniären Vorteil bedeutet. Schließlich liegt aber natürlich in der zentralen Erzeugung der gesamten Energie ein weiterer Vorteil, je weniger man heutzutage noch mit Betriebsstörungen in den großen Drehstromzentralen zu rechnen hat. Die Betriebskosten stellen sich bei elektrischem Betrieb nicht höher als bei Dampfmaschinenbetrieb.

Die Installationen in den Bergwerken selbst boten bei dieser ganzen Entwicklung nicht geringe Schwierigkeiten: man hatte nicht nur oft mit großer Feuchtigkeit zu kämpfen, besondere Vorsichtsmaßregeln waren auch geboten, um nicht Schlagwetter durch den elektrischen Betrieb hervorzurufen. Als Leitungen werden durchgängig Kabel verwandt, und diese müssen z. B. in den Schächten ziemlich freitragend nach unten geführt werden. Riß dann ein Kabel, so bildete sich ein Lichtbogen, und die Entzündung konnte erfolgen, ein Vorgang, der bei elektrischen Installationen in anderen Betrieben sehr selten eintreten kann. Man verwendet daher im Bergbau besondere Grubenkabel, die mit Eisendrähten so stark bewehrt sind, daß sie das eigene Gewicht des Kabels bei den vorkommenden Längen mit Sicherheit selbst zu tragen imstande sind. Man hat auch noch besondere Konstruktionen vorgeschlagen, bei denen ein besonderer Draht im Kabel eingezogen ist, der immer früher als die eigentliche Kabelseele bei zu großer Belastung reißen soll. In diesem Falle kann sofort etwa ein Relais in Tätigkeit gesetzt werden und der Ölschalter die Stromzuführung zur eigentlichen Kupferseele unterbrechen. Bisher haben sich aber der-

artige Vorrichtungen nicht bewährt, man begnügt sich lieber damit, die Kabelarmatur besonders stark zu wählen. Auch die Ausführung der Sicherungen, Schalter usw. bot einige Schwierigkeit wegen der Vermeidung von Schlagwettern, bis man auch hier zu den bewährten Sicherungen und Schaltern unter Öl griff. Eine größere Anzahl von besonderen Transporteinrichtungen, von Abteufpumpen u. dgl. m. wären außer den im Anfang erwähnten Apparaten und Hilfsmaschinen noch darzustellen, wollte man einen einigermaßen vollständigen Umriß von der Verwendung der Elektrizität im heutigen Bergbau geben.



Abbildung 209. Förderanlage der Zeche Gottfried Wilhelm in Rellinghausen, ausgeführt von den Siemens-Schuckert-Werken, Berlin.

Die Elektrizität in Walz- und Hüttenwerken. Die elektrische Energie ist in Hütten- und Walzwerken früher und in größerem Maßstabe in Amerika nutzbar gemacht worden als in Europa. Wer etwa vor zehn Jahren ein neugebautes Walzwerk drüben besichtigte, konnte schon dabei etwa folgenden Betrieb kennen lernen: Vom Hüttenwerk kommt das geschmolzene Eisen in einem großen, mit feuerfestem Material ausgekleideten Spezialwagen, von einer elektrischen Lokomotive gezogen, zum Walzwerk gefahren: Hier wird das Metall in Blöcke gegossen, von solcher Größe, wie sie der Walzprozeß nachher erfordert. Die Blöcke werden in besonderen Öfen, in der Gegend von Pittsburg sogar direkt mit Naturgas, das dort dem Boden entströmt, auf der für das Walzen richtigen Temperatur gehalten. Durch besondere elektrisch betätigte Hebezeuge, die fahrbar auf Schienen angeordnet sind, werden die Blöcke nach Belieben den Öfen entnommen und auf einen Wagen gelegt, dessen Oberfläche mit Stahlwalzen versehen ist. Der Wagen fährt wiederum elektrisch, und zwar aus der Ferne betätigt, zu den Walzenstraßen. Auch die Zuführung zu diesen geschieht durch Stahlrollen, die nach Belieben in jeder Drehrichtung in Bewegung gesetzt werden können. Hat also der Wagen diese Rollen erreicht, so werden sie geradeso wie die Rollen des Wagens selber in Bewegung gesetzt und der Block wird den profilierten Öffnungen in den Walzen, den „Kalibern", selbsttätig zugeführt. Hat er die Walze passiert, so nimmt eine gleiche, aber ansteigende Rollenvorrichtung den schon längergestreckten Block auf, er verliert aufwärtslaufend seine Geschwindigkeit und kehrt zu der nächsten Profilöffnung oder Kaliber der Walzenstraße zurück. Dies wird fortgesetzt, bis die fertige Schiene oder der fertige Träger die Walzenstraße verläßt. Er wird automatisch durch eine Kreissäge auf die richtige Länge abgeschnitten und noch ein Stück weiter auf Rollen transportiert. Haben sich einige Träger angesammelt, so werden sie mit einem geeigneten elektrischen Kran mit Zangen ergriffen und entweder zur Verfrachtung auf den Waggon gehoben oder auf Stapel gelegt. Bei den eigentlichen Walzen unterscheidet man bekanntlich zwei mechanisch

abweichende Arten, entweder sind drei Walzen übereinandergelagert und der Träger passiert einmal die beiden oberen, bei der Rückkehr die beiden unteren Walzen. In diesem Falle kann die Walzenstraße selber stets in gleichem Sinne angetrieben werden, die zubringenden Rollenvorrichtungen müssen aber jedesmal elektrisch oder hydraulisch gehoben oder gesenkt werden. Bei sehr schweren Stücken, wenn dieses Heben oder Senken zu große Schwierigkeiten machen würde, kann man auch das zu walzende Gut immer in der gleichen Ebene nur durch verschiedene Öffnungen (Kaliber) der Walze, die nebeneinander angeordnet sind, gehen lassen oder zum Walzen von Knüppeln die Walzen einfach enger stellen. Man bezeichnet diese letztere Art bekanntlich als Reversierwalzwerk, da natürlich jedesmal nach dem Passieren des Blockes durch die Walzenstraße die Richtung des Antriebsmotors umgekehrt werden muß. Es ist natürlich leichter, die doppelte Walzenstraße mit einem Elektromotor von großem Schwungmoment und besonders eingebautem Schwungrad anzutreiben, als ein Reversierwalzwerk. Auch in Amerika hat man daher zunächst die doppelten Walzenstraßen mit Elektromotoren angetrieben. Ist so der ganze Betrieb, vom Hereinbringen des flüssigen Eisens an bis zur Verfrachtung, elektrisch organisiert, so läßt er sich fast vollständig durch geeignete Schalter und Anlasser, etwa mit Ausnahme des Aus- und Einbringens in die Wärmeöfen, von der Ferne aus regulieren, und tatsächlich kann man in einzelnen nordamerikanischen Walzwerken die Konzentration fast aller Schalthebel auf einem Schaltpult sehen, so daß im eigentlichen Arbeitsraum nur eine ganz geringe Anzahl von Arbeitern nötig ist. Man ist bisher in der Ersparung von Menschenkräften in Europa wohl noch nicht so weit gegangen wie in Amerika, da die bedeutend höheren Aufwendungen für einen fast automatischen Betrieb sich bei den geringeren Löhnen bei uns noch nicht lohnen. Dagegen ist man auch bei uns mit der Einführung des elektrischen Antriebs sowohl der doppelten wie der Reversierwalzwerke eifrig beschäftigt. Die mechanischen Anforderungen, die an einen Motor für ein Reversierwalzwerk gestellt werden, sind wohl die höchsten, die überhaupt im Maschinenbau vorkommen. Es handelt sich um Motoren von einer Leistung bis zu 15000 P.S. Sie haben ihre Normaltourenzahl in wenigen Sekunden zu erreichen und müssen nach Durchgang des Walzgutes in ebenso kurzer Zeit wieder zum Stillstand kommen, um sich nun in entgegengesetzter Richtung zu drehen. Die gewaltigen Energiemengen, die so



Abbildung 210. Gleichstrommotor mit zwei Ankern für je 650 Volt, direkt gekuppelt mit der Welle des Reversierwalzwerks. Auch die Welle der oberen Walze ist links sichtbar. Die Walzen von 1100 mm Durchmesser dienen zum Auswalzen von Blöcken und Knüppeln von 4,5 t Höchstgewicht. Anlage der Oberschlesischen Eisenindustriegesellschaft Gleiwitz, Julienhütte. Ausgeführt durch die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft, Berlin

momentan gebraucht werden, können natürlich nicht ohne weiteres irgendeinem Netz entnommen werden. Entweder ist die Verwendung von großen Akkumulatorenbatterien oder von Schwungmassen nach dem Ilgner-System notwendig. Eine moderne elektrische Anlage für ein Reversierwalzwerk ersieht man aus der Abbildung 210. Der Motor ist mit der Walzenstraße direkt gekuppelt, er besitzt aber zwei auf dieselbe Welle aufgekeilte Anker, die hintereinandergeschaltet sind, wodurch die Kommutierungsschwierigkeiten geringer sind als bei einem einzigen mit doppelter Spannung oder doppelter Stromstärke. Die Motoren machen 65 bis 90 Umdrehungen pro Minute in beliebiger Richtung, was, wie früher ausgeführt, durch verschiedene Spannung des Ilgner-Umformeraggregats erreicht wird. Dessen Größe für den obengenannten Doppelmotor ersieht man aus Abbildung 211.

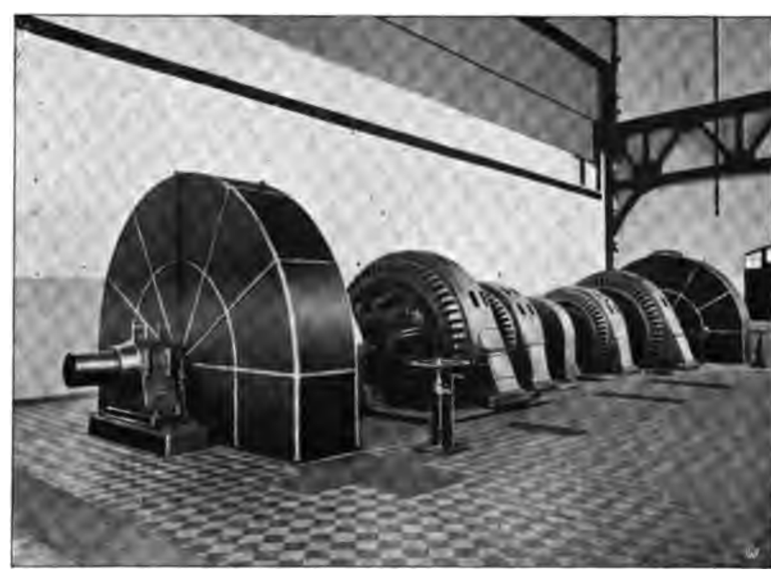


Abbildung 211. Schwungrad-Aggregat nach Ilgner der Oberschlesischen Eisen-Industriegesellschaft Gleiwitz, Julienhütte. Der Strom wird dem Drehstromnetz der mit Dampfturbinen betriebenen Oberschlesischen Elektrizitätswerke entnommen. Jedes der beiden Schwungräder besitzt ein Gewicht von 24 t, die normale Leistung jedes Umformermotors 1000 P.S., während der zu betreibende Walzmotor Abbildung 210 vorübergehend 8100 P.S. entwickeln kann. Ausführung der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft, Berlin.

Verwendet man nicht Schwungräder nach Ilgner zur Aufspeicherung der Energie, sondern steht Gleichstrom zur Verfügung und man will Akkumulatorenbatterien zum Ausgleich des Energieverbrauchs benutzen, so stößt man praktisch genau wie beim Ilgner-System zunächst auf Schwierigkeiten: weder dort noch hier genügt es, daß Energiemengen aufgespeichert sind, sie brauchen deshalb noch lange nicht einen Ausgleich in der Energieentnahme aus dem Netz in dem gewünschten Umfange herbeizuführen. Beim Ilgner-System mußte deshalb bei kleinen Schwankungen der Stromentnahme aus dem Netz die Tourenzahl des antreibenden Drehstrommotors künstlich verlangsamt oder beschleunigt werden durch den automatischen Schlupfregler (vgl. S. 310). Ebenso muß die Spannung der parallelgeschalteten Akkumulatorenbatterie künstlich auch bei geringer Zunahme der Stromentnahme aus dem Netz gesteigert werden, soll sie die Hauptrolle bei der Energieausgleichung übernehmen. Andernfalls würde sie wohl einen Teil übernehmen, ein großer Teil würde sich aber doch als unliebsame Spannungsschwankung im Netz bemerkbar machen. Diese Forderung löst die Zuschaltung einer Pirani-Maschine, die in ihrer einfachsten Form eine Dynamo mit zwei Feldwicklungen ist, die gerade umgekehrt wie bei einem Compound-Generator im entgegengesetzten Sinne von zwei Strömen durchflossen werden. Die Nebenschlußwicklung liegt an der Batteriespannung, die Hauptstromwicklung wird vom Netzstrom im entgegengesetzten Sinne durchflossen. Bei einem bestimmten normalen Wert heben sich beide in ihrer Wirkung auf, der Anker, der

hinter die Batterie geschaltet ist, zeigt also keine Spannung, und diese Batterie selbst gibt auch keine Energie ab oder nimmt solche auf, da sie dann genau dieselbe Spannung wie das Netz besitzt. Steigt oder fällt aber der Netzstrom über oder unter den normalen Wert, so gibt der Anker der Batterie eine Zusatzspannung, die sich bei steigendem Netzstrom addiert, bei sinkendem subtrahiert. Dadurch wird auch die Batterie erst befähigt, Energie abzugeben oder aufzunehmen.

Die ausgeführten Anlagen scheinen gegenüber dem geschilderten einfachen Schema dadurch komplizierter, daß die Pirani-Maschine als Dynamo noch einen Antriebsmotor erfordert und meist mit einer besonderen Erregermaschine ausgestattet wird. Die Pirani-Maschine findet auch in Bahnzentralen Verwendung.

Während die Anwendung der Elektrizität zu motorischen Zwecken im Walzwerksbetrieb in Amerika früher einsetzte als in Europa, ist umgekehrt die Benutzung sonst nutzloser Energie in den Abgasen der Hochöfen der Eisenhütten in Europa früher ausgebildet worden als drüben. Sie wird heutigestags in den meisten Fällen in Großgasmaschinen zum Antrieb vielpoliger Drehstromdynamos benutzt, die dann wieder die notwendige Energie für das benachbarte Walzwerk liefern.

Aber auch das Hüttenwerk selbst hat in den Aufzugsvorrichtungen zur Beschickung der Hochöfen einigen Kraftbedarf. Neuerdings ist man auch der Frage des elektrischen Antriebs der Luftkompressoren oder Gebläse nähergetreten, die sowohl die Hochöfen selbst wie die Bessemerbirnen usw. erfordern. Während die älteren Kompressoren bei niedrigen Tourenzahlen von Dampfmaschinen angetrieben wurden und gewaltige Dimensionen erhielten, zeitigte der elektrische Antrieb die Zentrifugalkompressoren, raschlaufende, ventillose Maschinen, deren Konstruktion aber zunächst mindestens auf dieselben praktischen Schwierigkeiten stieß wie die der verwandten Hochdruck-Zentrifugalpumpen für Wasser; in raschlaufenden Rädern wird die Luft von der Achsmitte nach außen geschleudert, zur Erzeugung des notwendigen Druckes muß sie aber dann einem zweiten System in der Nähe der Achse zugeführt werden usw. Die Schwierigkeiten sind inzwischen überwunden. Auch hier läßt der raschlaufende Elektromotor also die alten hin und her gehenden Maschinen mit ihren Stößen, ihren vielen Reparaturen und gewaltigen Dimensionen zugunsten kleiner, kontinuierlich und sicher arbeitenden Maschinen verschwinden. Die Entwicklung der Dampfturbinen läßt es heute freilich in sehr vielen Fällen ratsamer erscheinen, große Kompressoren direkt von Dampfturbinen als „Turbokompressoren" antreiben zu lassen, besonders wenn nur Drehstrom zur Verfügung steht, aber die verschiedensten Drucke, d. h. Tourenzahlen des Kompressors gefordert werden.

S c h i f f s i n s t a l l a t i o n e n. Die Elektrizität dient auf S c h i f f e n heutigestags zur Beleuchtung, zum Betrieb von Winden, Ventilatoren usw. und zu einer großen Anzahl von Signal- und Steuerapparaten. Besonders in der Kriegsmarine wird sie in immer erweitertem Maßstabe angewandt, wir erwähnten an anderer Stelle schon die Drehvorrichtung für Panzertürme mit Motoren in Leonard-Schaltung, dazu kommen die Munitionsaufzüge, die Scheinwerfer, kurz, es ist an Bord eines heutigen großen Panzerschiffes allein eine elektrische Einrichtung, deren Wert eine Million Mark übersteigen dürfte, auch abgesehen von elektrischen Spezialeinrichtungen, wie etwa der für drahtlose Telegraphie. Von dieser wie von allen Signalapparaten soll hier abgesehen werden.

An die Installationsarbeiten werden auf Schiffen ganz besondere Anforderungen gestellt. Zunächst ist die Frage, ob die Dynamos zu zentralisieren sind oder besser an verschiedenen Stellen aufgestellt werden, so daß selbst beim Vollaufen des Ma-

schinenschotts noch nicht die ganze Lichtanlage zu versagen braucht. Meist wird mindestens eine Dynamo als Reserve in einem besonderen Raume über der Wasserlinie eingebaut. Akkumulatoren vermeidet man, mit Ausnahme der Unterseeboote, wo gerade sie die Energie zur Fortbewegung unter Wasser liefern. Denn die Säure der Akkumulatoren würde bei den starken Schwankungen des Schiffes auslaufen und direkte Unfälle herbeiführen können, wie tatsächlich die Lage eines vollaufenden Unterseebootes vor kurzem dadurch kritisch wurde. Auch das hohe Gewicht der Akkumulatoren spricht gegen ihre Verwendung auf Schiffen. Natürlich bringt der beschränkte Raum und die teilweise hohe Temperatur des Maschinenraumes, speziell für Dampfer, welche die Tropen passieren, besondere Anforderungen an den Konstrukteur der Maschinen mit sich, damit die Erwärmung keine zu hohe und die Isolation nicht zu gering wird. Die Installation muß auf Schiffen ganz besonders ausgebildet werden, es wird vollständige Sicherheit gegen Eindringen von Wasser, gegen mechanische Beschädigung beim Schiffsreinigen, beim Anstreichen und möglichst leichtes Gewicht gefordert. Alle Sicherungen werden also in wasserdichte Gehäuse eingeschlossen, Schalter, Anschlußdosen, Verzweigungsdosen usw. besonders ausgebildet. Bei der Wahl der Instrumente ist auf die gewaltigen Eisenmassen des Schiffes Rücksicht zu nehmen. Früher benutzte man allgemein den Schiffskörper selbst als Rückleitung für den elektrischen Strom; dadurch wurden die Kosten und das Gewicht bedeutend vermindert. Aber natürlich war es auch noch schwieriger, einen guten Isolationszustand der Anlage zu erhalten. Man ging deshalb nicht über 65 Volt Spannung bei Schiffsinstallationen hinaus. Gegen die Verwendung des Schiffskörpers als Leiter spricht vielleicht der Umstand, daß man nie weiß, welchen Weg der elektrische Strom in ihm nimmt. Wählt man Gleichstrom, so kann dieser elektrolytisch wirken, wenn er z. B. von einer Stahlplatte durch Nieten und minimale feuchte Zwischenräume hindurch zu einer anderen geht, und kann dabei Rosten und Zersetzen des Materials befördern. Da noch sehr viele andere Umstände hierzu Veranlassung geben können, ist freilich bis heute noch kein exakter Beweis dafür erbracht, daß die Rückleitung durch den Schiffskörper schädlich wirkt.

Man ist aber heute vielfach zu besonders verlegten Rückleitungen übergegangen. Da dadurch einmal die Isolationsmöglichkeit wächst, anderseits aber das Gewicht der verlegten Leitungen zunimmt, so wählt man dann eine Spannung von 110 Volt, doch darf man nach den Vorschriften des Germanischen Lloyds noch nicht über 125 Volt hinausgehen. Auch bei 110 Volt wird jedoch zuweilen der Schiffskörper ohne Schaden als Rückleitung benutzt.

Bei der großen Bedeutung, die die Motoren gerade auf Kriegsschiffen besitzen, scheint es zunächst fraglich, ob hier nicht dem Drehstrom der Vorzug zu geben ist, da man von dem Hauptvorteil des Gleichstroms, der Möglichkeit der Aufspeicherung, doch keinen Gebrauch machen wird. Gleichstrom hat aber noch andere Vorzüge, z. B. für die Scheinwerfer, für die er wegen der Lichtverteilung des Gleichstromlichtbogens (vgl. S. 334) allein in Frage kommt, für ihn sprechen ferner gerade bei der Frage des motorischen Antriebs die Eigenschaften des Hauptstrommotors, die diesen für Hebezwecke u. dgl. sehr geeignet machen; gegen ihn sein starker Einfluß auf den Kompaß, der wie jeder Magnet durch elektrische in der Nähe vorbeifließende Ströme abgelenkt wird. Dieser Nachteil ist nur durch eine sehr sorgfältig ausgearbeitete Leitungsführung zu beheben. Ebensowenig wie die Möglichkeit der Aufspeicherung auf der einen Seite, braucht die Transformierbarkeit des Drehstroms auf der anderen Seite ins Auge gefaßt zu werden, so daß mehr der Nachteil des Drehstroms ins Gewicht

fällt, daß die Schaltanlage dadurch komplizierter wird, daß zur Erregung doch noch eine Gleichstromerreger-Maschine mit den zugehörigen Hebeln, Regulierwiderständen usw. notwendig wird. Die Verwendung des Drehstroms in der Marine ist infolgedessen über ein paar Anlagen nicht hinausgekommen.

Bei der Verwendung des Gleichstroms ohne Akkumulatorenbatterien machen sich nun die größeren Motoren des Schiffes beim Aus- und Einschalten unangenehm bemerkbar, wenn sie parallel mit der Schiffsbeleuchtung an dasselbe Netz angeschlossen sind. Beim Einschalten fällt durch den großen Strombedarf die Spannung, die Lampen werden dunkel, beim Ausschalten steigt die Spannung an ihnen wegen des geringeren Spannungsabfalles. Man sieht sich daher genötigt, zwei Verteilungsnetze, eines für Kraft und eines für Licht, im Schiffe zu verlegen. Häufig werden sogar beide Netze von verschiedenen Dynamos gespeist, und die Schaltanlage ist so eingerichtet, daß jede Dynamo im Schiff entweder auf den einen oder den anderen Stromkreis zu schalten ist. Das macht die Anlage verhältnismäßig kompliziert. Bei guten modernen Maschinen mit geringem Spannungsabfall genügt es aber auch, wenn beide Verteilungsnetze direkt an die Sammelschienen angeschlossen werden. Auch dann bleibt ein starker Spannungsabfall durch großen Energieverbrauch im Kraftnetz ohne Einfluß auf die Glühlampen. Getrennt vom Kraft- und normalen Lichtnetz ist bisweilen noch ein drittes Leitungsnetz vorhanden, an das eine Anzahl Kontroll- und Notlampen angeschlossen sind und das speziell von der Reservedynamo über der Wasserlinie mit Strom versorgt werden kann.

Seit der Einführung der Dampfturbine in den Schiffbau könnte sich der Umsetzung der Energie auf elektrischem Wege noch ein weiteres Feld erschließen. Der Nachteil der Dampfturbine ist der, daß ihre Drehrichtung nicht umkehrbar ist und sie nicht bei den verschiedensten Tourenzahlen mit gleich günstigem Wirkungsgrad laufen kann. Nun fährt freilich ein Fracht- und Personendampfer in der Hauptsache mit gleichbleibender Geschwindigkeit, aber auch er muß bei Nebel und bei der Einfahrt in den Hafen mit verminderter Geschwindigkeit, eventuell auch rückwärts fahren, wenn auch schwierigere Manöver durch Schlepper unterstützt werden. Besonders aber bei Kriegsschiffen werden die verschiedensten Geschwindigkeiten (normales, forciertes und Marschtempo) und große Manövrierfähigkeit verlangt; das kann elektrische Kraftübersetzung, wie man an der Ausbildung des Ilgner-Systems auch ohne Akkumulatorenbatterien sieht, leisten, freilich unter Aufwendung einer ganzen Anzahl von Apparaten und elektrischen Maschinen. Auch das Steuer, das ja meist von einer besonderen Dampfmaschine betrieben wird, ist schon vielfach auf elektrischem Wege betätigt worden.

Die Elektrizität in der Landwirtschaft. Auch der Landwirt, der früher dem maschinellen Betriebe und speziell der Elektrizität sehr skeptisch gegenüberstand, wünscht sich heute allgemein elektrische Beleuchtung der Ställe und Antrieb seiner Maschinen mit Elektromotoren. Er ist für ein Elektrizitätswerk an und für sich ein schlechter Abnehmer, da sein Lichtkonsum kurzzeitig, sein Kraftbedarf tagsüber ein unregelmäßiger ist, der außerdem stark mit der Jahreszeit wechseln kann. Für die landwirtschaftlichen Betriebe selbst ist dagegen die elektrische Beleuchtung am wenigsten feuergefährlich und der Elektromotor das ideale Antriebsmittel, da dessen An- und Abstellen von jedem ungelernten Arbeiter leicht ausgeführt, seine Wartung und Reparaturbedürftigkeit gering, seine Überlastungsfähigkeit und sein Anzugsmoment groß und sein Gang gleichmäßig ist, und da er vor allem stets betriebsbereit ist. Dieser Umstand erleichtert dem Landwirt vor allem die freie Disposition über die Arbeitsfolge, er kann z. B. bei Wetterumschlag sofortiges Dreschen anordnen, wenn

ihm ein Elektromotor zur Verfügung steht, während bei einer Dampflokomobile eine bis zwei Stunden über dem Anheizen vergehen. Die Betriebsbereitschaft trifft natürlich nur für Güter zu, die an eine Überlandzentrale angeschlossen sind oder eine Akkumulatorenbatterie besitzen.

Die Installation landwirtschaftlicher Gebäude ist schwierig. Ältere Ställe und Scheunen sind oft für jede Beleuchtungsart feuergefährlich. Die Ställe sind besonders im Winter von feuchtem Brodem der Tiere erfüllt, der an den Leitungen kondensiert und ihre Isolation herabsetzt; die Luft besonders in Schweineställen ist von ätzenden Dünsten der Exkremente erfüllt. Da die Gebäude einzeln liegen, sind viele Hauseinführungen notwendig. Bei dem üblichen Kälken wird bis heute auf die Installationsanlage von Landwirten wenig Rücksicht genommen. Verzinnter Eisendraht auf Isolatoren oder Hackethaldraht führt in Ställen, Verlegung in Rohren führt in den Scheunen meist zum Ziel.

Der Antrieb der landwirtschaftlichen Hofmaschinen, z. B. zum Futterschneiden, für die Molkerei, Stellmacherei usw., erfolgt ebenso wie derjenige in landwirtschaftlichen Fabrikanlagen, wie Brennerei und Ziegelei, durch normale Motoren mit Riemenübertragung. Die Dreschmaschine ist als erste landwirtschaftliche schon organisch mit einem Elektromotor direkt verbunden worden, doch wird auch sie noch meist von einem Motor auf besonderem Wagen mit Riemen angetrieben. Sie gebraucht, falls sie auch mit allen Apparaten für einfache oder doppelte Reinigung ausgestattet ist, von allen landwirtschaftlichen Maschinen mit Ausnahme des elektrischen Pfluges die größte Anzahl P.S., 15 bis 35, je nach ihrer Größe; sie hat daher bei Hochspannungsanlagen häufig ihren eigenen Transformator nötig, besonders wenn auch auf dem Felde gedroschen werden soll. Ist eine eigene Zentrale zu errichten, so ist in diesem Falle die Wahl der Spannung schwierig. Mit 110 Volt, der Spannung, die man der Akkumulatoren, der Metallfadenlampen und der Bogenlampen für eine Hofbeleuchtung wegen sonst wählen wird, kann man jene Energie nicht rationell auf das Feld leiten. Bei einer Doppelanlage, 110 Volt mit Akkumulatoren für Licht und kleine Hofmaschinen, 440 Volt für Kraftleitung zum Dreschen, geht man des Vorteils der steten Betriebsbereitschaft für die Dreschmaschine verloren, wenn die beiden Dynamos mit einer Dampfmaschine, etwa der der Brennerei, angetrieben werden.

Diejenigen Tätigkeiten des Landwirts, bei denen er die Hilfe der Elektrizität noch selten oder nie genießt, sind einmal die Bestellung der Felder, vor allem also das Pflügen, andererseits das Ernten.

Elektrische Pflüge werden entweder nach dem Zweimaschinensystem gebaut, bei dem zwei auf beiden Seiten des Feldes vorrückende Wagen mit Elektromotoren den mehrscharigen Kipppflug durch ein Stahlseil hin und her ziehen. Bei den Motorwagen ist der elektrische Strom durch ein flexibles Kabel und einen Transformator von der Hochspannungsleitung zuzuführen. Beim Einmaschinensystem wird der eine Motorwagen durch einen Ankerwagen ersetzt. Auf diesem befindet sich eine Seilscheibe, über die das Zugseil vom Pfluge geführt wird, um dann wieder zum Motorwagen zurückzukehren; dieser kann also auch den Pflug von sich fortziehen, zieht er ihn auf sich zu, so muß der Ankerwagen automatisch ein Stück vorrücken. Obgleich das elektrische Pflügen mit geringeren Betriebskosten — etwa 4 bis 5 Mark für den Morgen bei etwa 20 Pfennig Strompreis für die Kilowattstunde — verknüpft ist als das Dampfpflügen (etwa 8 Mark), sind bisher, 1911, erst etwa 20 elektrische Pflüge in Tätigkeit gegenüber 1000 Dampfpflügen. Die Unkosten der ersten Installation, manche Konstruktionsfehler der ersten Ausführungen und manche Betriebsstörungen

standen ihm bisher im Wege. Auch ist es zweifelhaft, ob heute schon viele Überlandzentralen die zum Pflügen notwendige Energie von 30 bis 90 P.S. ohne große Störungen für ihren sonstigen Betrieb werden liefern können, da gerade beim Pflügen der Kraftbedarf ein vollständig stoßweiser ist. Dann fällt in dem betreffenden Teile des Netzes die Spannung stark, schon eingeschaltete Lampen zucken gewaltig. Sollten sich die Überlandzentralen immer mehr vergrößern, z. B. die Hoffnung, die Moore Norddeutschlands zu großen elektrischen Zentralen für Landwirtschaft zu verwerten, sich verwirklichen, in Süddeutschland aber die Wasserkräfte immer intensiver ausgenutzt werden, so wird auch das elektrische Pflügen sich rasch weiterentwickeln und auch andere Arbeiten für das Bestellen der Felder für elektrischen Antrieb eingerichtet werden.

Zur Unterstützung der Erntearbeiten werden bisher vereinzelt die Scheunen mit elektrischen Ablade- und Transporteinrichtungen versehen, auch hier steht der Elektrotechnik ein Gebiet der Betätigung offen.

WIRTSCHAFTLICHE FRAGEN. Tarife. Wenn auch im allgemeinen in diesem Werke nur technische Fragen, freilich unter Berücksichtigung ihrer wirtschaftlichen Grundlagen, behandelt werden sollen, reine wirtschaftliche Fragen dagegen auszuschalten sind, so muß doch noch kurz von den Tarifen gesprochen werden, da ihre Ausbildung auf die Organisation und Entwicklung der Zentralen selbst, aber auch auf die konstruktive Fortbildung der Elektrizitätszähler von großem Einfluß gewesen ist. Der Tarif soll nicht umständlich sein, den Verbrauch an elektrischer Energie erleichtern und doch die Kosten in gerechter Weise verteilen, d. h. diejenigen am höchsten belasten, deren Energiekonsum auch dem Elektrizitätswerk am meisten kostet. Selbstverständlich ist deshalb der Pauschaltarif, nach dem jeder Konsument je nach der Anzahl seiner angeschlossenen Lampen eine bestimmte Summe an das Werk abzuführen hat, schon längst überall abgeschafft worden, wo nicht die Energie etwa in Form von Wasserfällen in fast unbeschränktem Maße zur Verfügung steht. Denn er verleitet die Verbraucher einfach zur Energieverschwendung und ist stets ungerecht. Der bezahlte Preis soll vielmehr denjenigen um ein bestimmtes Maß übersteigen, den das Elektrizitätswerk selbst für die Erzeugung der Energie aufwenden muß. Mit steigender Betriebszeit der Maschinen und steigenden Kilowattstunden, die von der Zentrale damit abgegeben werden, sinken die Selbstkosten, da der Betrag der konstanten Unkosten wie Amortisation, Verzinsung usw. immer geringer werden im Vergleich zu den direkten Betriebskosten. Die Verkaufspreise müßten also eigentlich so gehalten werden, daß sie etwa nach der gestrichelten Kurve der Abbildung 212 verlaufen, wenn die ausgezogene Linie die Selbstkosten darstellt. Es würde daher theoretisch richtig sein, dem Abnehmer eine Grundtaxe unabhängig von seinem Konsum aufzuerlegen zur Deckung seines Anteils an den festen Unkosten der Zentrale und einen Tarif für seinen wirklichen Energieverbrauch, der mit der wachsenden Anzahl Brennstunden seiner Anlage abnimmt. Dabei könnte für Großkonsumenten noch ein besonderer Rabatt eingeräumt werden, da ja auch die Energie im Großen billiger hergestellt werden kann. Dieser theoretisch richtige Tarif hat sich jedoch praktisch keinen Eingang verschaffen können, da

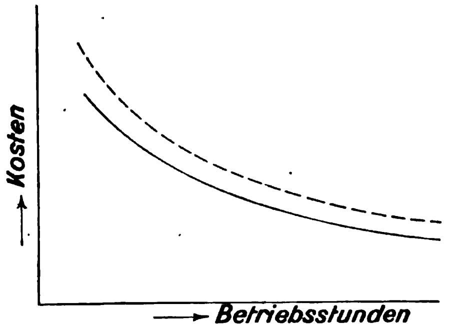


Abbildung 212. Betriebskosten in Abhängigkeit von den Betriebsstunden.

seine Berechtigung von den meisten Konsumenten nicht eingesehen wird. Vielfach findet man nur einen reinen Geldrabatt, d. h. je mehr an Elektrizität konsumiert wird, desto billiger wird sie geliefert. Dies ist aber vollständig ungerecht, wenn es sich um solche Verbraucher handelt, deren großer Bedarf gerade in die Zeit der größten Belastung der Zentrale (vgl. Abbildung 152) fällt. Denn dann sind wegen dieser Konsumenten vielleicht gerade größere, wenig ausgenutzte Maschinen aufzustellen. Man ist daher häufig dazu übergegangen, die Brenndauer der Anlage selbst zu berücksichtigen, was aber bei der Abrechnung einige Schwierigkeiten macht, oder aber einen Doppeltarif einzuführen. Ein solcher wurde jederzeit schon für Kraft und Licht gewährt, da eben Motoren das Netz länger und gleichmäßiger belasten als jede Lichtanlage, aber auch die Lichtenergie kann dann billiger geliefert werden, wenn sie außerhalb der Hauptbelastungszeit verlangt wird. Man konstruierte zu diesem Zwecke Zähler mit zwei Zählwerken, die sich automatisch umschalteten. Ihre Angaben werden also gesondert verrechnet. Da man nach der Belastungskurve den niedrigen Tarif im Sommer länger gewähren kann als im Winter, so werden solche Doppeltarifzähler noch verstellbar eingerichtet, so daß jeden Monat der Moment des Umschaltens bei der Kontrolle des Zählers verstellt werden kann. Ein solcher Doppeltarifzähler ist aus Abbildung 213 in einer Ausführung von H. Aron zu ersehen. Leider werden derartige Zähler und daher auch deren Miete außerordentlich teuer. Man hat sich vielfach in letzter Zeit mit der Möglichkeit einer noch weiteren Verbreitung der Elektrizität beschäftigt. Daß in der Tarifpolitik der Zentralen der Schwerpunkt liegt, wurde von allen Seiten betont, ohne daß bisher eine vollständige Klärung aller einschlägigen Fragen erreicht worden wäre.



Abbild. 213. Doppeltarifzähler mit beliebiger Einstellung von H. Aron, Charlottenburg.

Das staatliche Interesse an der Elektrizität. In letzter Zeit ist vielfach davon gesprochen worden, auch für den Staat einen erhöhten Anteil an der Umsetzung der elektrischen Energie vorzubehalten. Je größer die Zentralen werden und je mehr ihre Verteilungsnetze sich gegenseitig berühren, um so mehr liegt die Frage einer einheitlichen und dann natürlich staatlichen Organisation nahe. Daß ein Werk, wie z. B. das Rheinisch-Westfälische, die Energie bedeutend billiger liefern kann als die kleinen städtischen Zentralen, die es zum Teil ersetzt hat, ist ein großer volkswirtschaftlicher Vorteil, und dennoch machte sich sehr bald eine heftige Opposition gegen die Begründer des Werkes bemerkbar weil sie Privatleute waren und man eine Kartellbildung und allmähliche Preissteigerung nach Vernichtung aller kleineren Werke fürchtete. So entstanden Konkurrenzunternehmen von Städten oder Provinzen, und der technisch vorteilhaften einheitlichen Entwicklung der elektrischen Energieverteilung im ganzen Ruhrkohlengebiet wurde zunächst ein Riegel vorgeschoben. Eine andere Frage

ist die, ob in Zukunft die Staatsbahnen zum elektrischen Betriebe übergehen werden, da die Versorgung eines weitverzweigten Bahnnetzes mit verhältnismäßig geringem Verkehr dann nur durch weitere Abgabe von Energie an industrielle und andere Unternehmungen rentabel gemacht werden kann. Von den vielen Projekten, die in der Luft liegen, hat man bisher nur die Strecke Leipzig—Bitterfeld in Angriff genommen und in Bayern und Württemberg einige Linien für den elektrischen Betrieb ins Auge gefaßt. Die Schnellbahnversuche, die seinerzeit zwischen Berlin und Zossen angestellt wurden, haben ja gezeigt, daß man sogar Geschwindigkeiten bis zu 200 km pro Stunde ohne Gefahr auf gerader Strecke erreichen kann, daß also vielleicht die Elektrisierung der Bahn einen gewaltigen Fortschritt in unserem modernen Verkehrsleben bedeuten könnte. Aber ein Punkt steht dieser Entwicklung außer der Kostenfrage im Wege, es ist die militärische Bedeutung unserer Staatsbahnen. Nur mit Dampflokomotivbetrieb wird sich bei einem feindlichen Einfall ein Verkehr aufrechterhalten lassen, da die Zerstörung einer einzigen elektrischen Zentrale weite Strecken des Bahnnetzes unbrauchbar machen würde, und umgekehrt würde man ohne Dampflokomotiven in ein erobertes feindliches Land nicht eindringen können. Daher wird die Militärbehörde eine Elektrisierung nur der Bahnen zulassen, die entweder einer direkten strategischen Bedeutung entbehren oder insofern sich die Eisenbahnverwaltung bereit erklärt, die volle Anzahl Dampflokomotiven für den Mobilmachungsfall in Bereitschaft zu halten, eine Forderung, die natürlich jede Rentabilität einer elektrischen Bahn ausschließen würde. Man kann daher im Augenblick nur annehmen, daß man in langsamem Tempo diejenigen Bahnen mit elektrischem Antrieb versehen wird, auf denen ein stärkerer Personenverkehr existiert und die militärisch von gegeringer Bedeutung sind oder in deren Nähe auch noch eine Dampfbahn verkehrt. Viel eher wird dagegen die fortwährende Neugründung von Überlandzentralen und die Konflikte und wirtschaftlichen Nachteile, die aus zu zahlreicher Gründung derselben entstehen können, zu einem Eingreifen des Staates Veranlassung geben.

Die Elektrizität hat bisher ganz aus eigenen Kräften ihre Erfolge errungen und ein Gebiet des wirtschaftlichen Lebens nach dem anderen erobert. Sie hat sich selbst in den Verbandsvorschriften ihre Gesetze gegeben und sich dadurch leicht den geänderten Forderungen des Tages anzupassen verstanden. Erst im Laufe der letzten Jahre sind dann bekanntlich Stimmen in deren eigenen Reihen laut geworden, die das Erreichte unter die Autorität des Staates zu stellen verlangten, die Verbandsvorschriften in staatliche Gesetze oder polizeiliche Vorschriften umzuwandeln strebten. Aber noch sind die Aufgaben, die zu lösen sind, so mannigfach, die Neuerscheinungen auf den verschiedenen Gebieten der Elektrotechnik so zahlreich, daß es der freien Entfaltung aller Kräfte wie bisher zu ihrer Bewältigung in den kommenden Jahren bedürfen wird.

ELEKTROCHEMISCHE INDUSTRIE

VON K. ARNDT

Schon vor siebzig Jahren haben Christofle & Ko. in Paris die damals erfundene Kunst, metallische Gegenstände mit Hilfe des elektrischen Stroms zu vergolden, zu versilbern und zu vernickeln, in größerem Maßstabe ausgeübt. Solange man aber auf die teuren und lästigen galvanischen Elemente als Stromquelle angewiesen war, gedieh dieser älteste Zweig der elektrochemischen Industrie nur in bescheidenen Grenzen, und an andere chemisch-technische Anwendungen des elektrischen Stroms war kaum zu denken. Erst 1872 begann mit der Einführung der Dynamomaschine der Aufschwung; 1876 nahm die Norddeutsche Affinerie in Hamburg die elektrolytische Kupferraffination in großem Maßstabe auf; 1877 wurde auf dem Königlichen Hüttenwerk zu Oker im Harz eine noch viel größere Dynamo von Siemens & Halske aufgestellt und mit fast 1000 Ampere Stromstärke (bei 3,3 Volt Spannung) in zehn hintereinandergeschalteten Zellen täglich rund 250 kg Elektrolytkupfer niedergeschlagen.

Im folgenden Jahrzehnt trat die Elektrochemie durch die Alkalichloridelektrolyse in Wettbewerb mit den älteren rein chemischen Verfahren zur Gewinnung von Ätzkali, Ätznatron, Soda und Chlor. Die elektrolytische Herstellung von Aluminium ward durch Héroult und durch Hall zu einem technisch brauchbaren Verfahren ausgebildet, das die Massenfabrikation dieses nützlichen Metalls möglich machte. In den neunziger Jahren erschien die Karbidindustrie; sie war von vornherein ohne chemische Wettbewerber, da man das zur Erzeugung von Azetylen dienende Kalziumkarbid nur im elektrischen Ofen herstellen kann.

Nicht in gleichem Riesenschritt wie die Karbidfabrikation, aber doch auch mit vielfach überraschender Schnelligkeit entwickelten sich gleichzeitig andere Zweige der elektrochemischen Industrie. Jedes Jahr brachte Verbesserungen älterer Verfahren und neue Eroberungen. Auch das 20. Jahrhundert beschenkte uns bereits aus diesem reichen Gebiete mit vielverheißenden Gaben: „Verwertung des Luftstickstoffs" und „Elektrostahl".

Die schon heute insgesamt weit über eine Million Pferdekräfte verbrauchende elektrochemische Großindustrie ist durch ihre drei Grundbedingungen: billige Kraft, billige Rohstoffe und guten Absatz ihrer Erzeugnisse, auf verhältnismäßig wenige Orte der Erde beschränkt. Die großen Wasserkräfte der Alpen, des südlichen Norwegens und des Niagarafalls haben die elektrochemische Industrie mächtig angezogen. Aber auch in dem an Wasserkräften armen Deutschland bietet wohlfeile Braunkohle bei den Staßfurter Salzlagern gutes Gedeihen der Alkalichloridelektrolyse, welche für ihre Produkte im industriereichen Sachsen willige Käufer findet. Die böhmische Braunkohle wird in Aussig von einer großen elektrochemischen Fabrik des österreichischen Vereins für chemische und metallurgische Produktion zum gleichen Zwecke verwertet, und trotz der verhältnismäßig teuren Steinkohle blüht im rheinischen Industriebezirk, wo sich Farbwerke, Zellstoff-, Textil- und Seifenindustrie auf engem Raume drängen, auch die Elektrochemie.

Die Verfahren, welche die elektrochemische Industrie beherrscht, lassen sich in folgende Gruppen einteilen:

1. Gewinnung von Metallen aus ihren geschmolzenen Salzen (Schmelzelektrolyse). Auf diese Weise werden Aluminium, Magnesium und Natrium hergestellt.

2. Abscheidung reinster Metalle aus wässerigen Lösungen. Hier ist die Raffination von Kupfer, Silber und Gold in erster Linie zu nennen.

3. Galvanostegie (Verkupfern, Verzinken, Verstählen, Vernickeln, Versilbern, Vergolden) und Galvanoplastik (Vervielfältigung von Formen, Erzeugung von nahtlosen Rohren und anderen Metallgegenständen).

4. Erzeugung von Wasserstoff und Sauerstoff durch Wasserzersetzung.

5. Alkalichloridelektrolyse zur Gewinnung von Bleichlaugen, Ätzkali, Ätznatron, Soda, Chlor und chlorsaurem Kali.

6. Elektrothermie, die Ausnutzung der Heizkraft des elektrischen Stroms zur Erzeugung von Karbid, Ferrosilizium, Karborundum, Alundum, Graphit, Phosphor, Schwefelkohlenstoff und Elektrostahl.

7. Benutzung der Glimmlichtentladung in Ozonapparaten.

Die Oxydation des Luftstickstoffs im elektrischen Flammenbogen ist bereits in einem anderen Bande des Werkes besprochen worden.

Zahlreiche andere elektrochemische Prozesse, welche zurzeit in der Technik nur eine kleine oder gar keine Rolle spielen, will ich ganz beiseite lassen. Auch unter den Ausführungsformen der im folgenden zu besprechenden Verfahren mußte ich schon des beschränkten Raumes halber eine von Willkür nicht freie Auswahl treffen.

1. SCHMELZELEKTROLYSE

ALLGEMEINES. Durch Elektrolyse ihrer geschmolzenen Salze kann man viele Metalle gewinnen. Schmilzt man z. B. Bleichlorid in einem Tiegel, taucht zwei Kohlenstäbe als Stromzuführungen ein und schickt einen niedriggespannten Gleichstrom von einigen Ampere Stärke durch die Schmelze, dann entweicht an dem einen Kohlenstabe, der mit dem positiven Pol der Stromquelle verbunden ist, der positiven Elektrode oder Anode, stechend riechendes Chlorgas, an dem anderen mit dem negativen Pol verbundenen Kohlenstabe, der Kathode, scheidet sich metallisches Blei ab, das sich wegen seiner Schwere am Boden des Tiegels ansammelt. Erhitzt man freilich die Schmelze während der Elektrolyse auf eine unnötig hohe Temperatur, dann verteilt sich das metallische Blei als feiner Metallstaub in der glühenden Schmelze und wird von ihr wieder aufgelöst.

Es ist also bei dieser wie bei jeder Schmelzelektrolyse nötig, die Temperatur des Bades innerhalb enger Grenzen zu halten, um eine möglichst gute Ausbeute zu bekommen. Zu diesem Zwecke ist nicht nur die äußere Heizung des Schmelztiegels sorgfältig zu regeln, sondern man muß auch die zugeführte elektrische Energie richtig bemessen; denn nur ein Bruchteil dieser Energie wird zu der chemischen Reaktion (im vorliegenden Beispiel zur Abscheidung von metallischem Blei und Chlorgas) verbraucht; die übrige Energie muß den elektrischen Widerstand des Bades überwinden und wandelt sich dabei in Wärme um, welche das Bad erhitzt. Schickt man zu starken Strom in die Schmelze, so beginnt sie schließlich zu kochen und zu verdampfen; sind die zugeführten Watt zu den Abmessungen des Bades im richtigen Verhältnis, so behält das Bad auch ohne äußere Wärmezufuhr die richtige Temperatur. Diese Ausschaltung der Außenheizung hat den großen Vorzug, daß man nicht mehr genötigt ist, die Schmelzgefäße aus feuerfester Masse zu fertigen; solche großen Tiegel aus

Schamotte sind teuer, werden beim Anheizen oder Abkühlen leicht undicht und verunreinigen die Schmelze und das abgeschiedene Metall, weil sie chemisch angegriffen werden. Man nimmt statt dessen eiserne Kästen, die man aus Blechen zusammennietet, und kühlt sie von außen, so daß sie sich auf der Innenseite mit einer Schicht erstarrter Schmelze bekleiden. Freilich muß man nun auch peinlich darauf achten, daß während der Elektrolyse die zugeführte Stromenergie nicht zu klein wird und das Bad einfriert. Steigt nämlich vorübergehend durch irgendwelche Störungen — z. B. Verunreinigung der Schmelze oder der Elektroden — der Badwiderstand, so sinkt bei konstanter Stromquelle die Amperezahl und, da die im Bade entwickelte Stromwärme dem Quadrat der Stromstärke proportional ist, auch sehr rasch die Temperatur, und die Schmelze erstarrt, wenn man nicht schleunigst für genügende Energiezufuhr sorgt.

Der Leser sieht, daß die anscheinend so einfache Elektrolyse doch in der praktischen Ausführung mannigfaltige Schwierigkeiten bietet. Im Falle des Bleies sind diese Schwierigkeiten leicht zu überwinden; dennoch wird niemand durch Schmelzelektrolyse Blei in großem Maßstabe herstellen, solange die gewöhnliche Verhüttung billiger ist, bei welcher das geröstete Erz mit Kohle erhitzt und dadurch geradeswegs zu Metall reduziert wird, ohne daß man erst aus den Erzen die teuren Chlorverbindungen herzustellen braucht.

Ganz anders liegt die Sache beim Aluminium, Magnesium und Natrium, zu deren Gewinnung die Elektrolyse den heute allein begangenen besten Weg bietet.

ALUMINIUM. Wie in jüngster Zeit einwandfrei festgestellt wurde, kann man auch durch Kohle dem Aluminiumoxyd, der Tonerde, ihren Sauerstoff entziehen, aber diese Reduktion vollzieht sich erst bei 2000° C, also bei einer Temperatur, die weit über der Weißglut des Hochofens liegt. Deshalb mußte man früher zur Aluminiumgewinnung den kostspieligen und unbequemen Umweg einschlagen, daß man mit metallischem Natrium, welches besonders große Reduktionskraft hat, das aus Tonerde künstlich hergestellte Doppelsalz Aluminiumnatriumchlorid zusammenschmolz. Hier gewährte die Elektrolyse, sobald man über Elektrizitätsquellen von genügender Wohlfeilheit und Stärke verfügen konnte, die größten Vorteile.

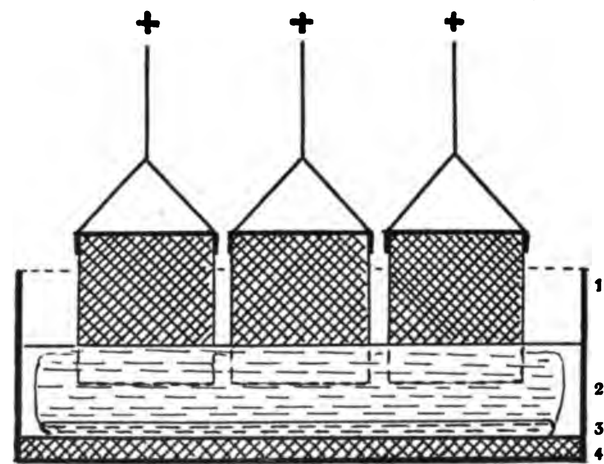


Abbildung 1. Aluminiumofen.
1 Kastenwand — 2 Erstarrte Schmelze — 3 Aluminium — 4 Bodenplatte aus Kohle.

Als Gefäß dient ein niedriger Kasten aus Eisenblech, der durch Winkeleisen abgesteift ist. Sein Boden wird von einer Kohlenplatte bedeckt, die gleichzeitig als negative Elektrode dient. Von oben her hängen eine Anzahl dicker Kohlenblöcke als Anoden in die Schmelze hinein. Abbildung 1 zeigt schematisch diese Anordnung. Das vom Strom durchflossene feuerflüssige Bad besteht aus Aluminiumnatriumfluorid, das mit Tonerde gesättigt ist. Dieses Fluordoppelsalz des Aluminiums, der Kryolith, kommt besonders auf Grönland in großen Lagern von genügender Reinheit vor; die möglichst reine Tonerde muß erst aus Bauxit, einem natürlichen Tonerdehydrat,

das mit Kieselsäure, Eisen, Titan und anderen Beimengungen verunreinigt ist, durch Erhitzen mit Soda oder Natronlauge hergestellt werden.

Wenn man einen Aluminiumofen in Betrieb setzen will, so bringt man zunächst die Anoden mit der Bodenplatte in leitende Verbindung, indem man entweder die an Flaschenzügen befestigten Anoden senkt, bis sie den Boden berühren, oder indem man zwischen den Boden und jede Anode Kohlenstäbchen klemmt. Durch die Wärmewirkung des Stroms werden die Kohlenstäbchen glühend, und der um sie aufgehäufte Kryolith schmilzt; ist die Schmelze dünnflüssig, so holt man die Stäbchen mit einer Zange heraus. Arbeitet man ohne Heizstäbe, so erzeugt man durch Anheben der Anoden Lichtbögen, in deren Hitze die Beschickung baldigst schmilzt. Nach beendetem Einschmelzen sollen die Anoden so weit in die Schmelze tauchen und der zugeführte Strom derart bemessen werden, daß das Bad etwa 900° heiß bleibt und die Elektrolyse bei etwa 6 Volt Spannung ruhig vor sich geht. An den Seitenwänden des Kastens bildet sich eine feste Kruste von erstarrter Schmelze, welche das Eisenblech vor der Zerstörung schützt. Die Bodenplatte bedeckt sich bald mit geschmolzenem Aluminium, das von Zeit zu Zeit durch eine Abstichöffnung abgelassen oder mit eisernen Löffeln ausgeschöpft wird.

Während des Betriebes muß sorgfältig darauf geachtet werden, daß die Schmelze stets genügend Tonerde enthält. Da durch den Strom die Tonerde zerlegt wird, so muß ein Arbeiter von Zeit zu Zeit neue Tonerde zugeben.

Die einzelnen Bäder werden mit 8000 bis 10000 Ampere Stromstärke betrieben; da die erforderliche Badspannung nur 5 bis 6 Volt beträgt, so schaltet man eine ganze Reihe von Bädern hintereinander, indem man die Anoden des einen Bades mit der Bodenplatte des nächsten Bades verbindet. Auf diese Weise kann man Dynamomaschinen für höhere Spannung benutzen (z. B. mit 110 Volt gegen 20 Bäder hintereinander betreiben), welche wirtschaftlicher arbeiten als Dynamos für niedrige Spannung, und spart außerordentlich an Stromleitungen, welche für so starke Ströme von vielen tausend Ampere sehr teuer sind; man braucht vom positiven Pol der Maschine nur ein Kabel zu den Anoden des ersten Bades und vom negativen Pol ein zweites Kabel zur Bodenplatte des letzten Bades der ganzen Reihe zu legen.

Nach der Theorie sollte ein Strom von 1000 Ampere während einer Stunde rund 1/3 kg Aluminium abscheiden; in Wirklichkeit werden aber nur 60 bis 70% dieser Menge erhalten. Steigt die Temperatur des Bades zu hoch, so ist die Ausbeute viel schlechter. Die aufgewandte elektrische Energie ist durch das Produkt Stromstärke × Badspannung × Zeit gegeben; sie beträgt für 1 kg Aluminium 22 bis 30 Kilowattstunden gleich 30 bis 40 Pferdekraftstunden.

Der größte Aluminiumerzeuger der Welt ist zurzeit die Aluminium Co. of America, deren Werke am Niagarafall und in Massena, N. Y., über 85000 P.S. verfügen. Ihr zunächst folgt eine deutsche Gesellschaft, die Aluminiumindustrie A. G.; sie hat Werke in Neuhausen am Rheinfall, in Rheinfelden oberhalb Basel, Lend bei Gastein und Chippis in der Schweiz mit zusammen 60000 P.S. 1901 wurden in der ganzen Welt über 7 Millionen kg, 1910 etwa 34 Millionen kg Aluminium hergestellt, mit einer Reinheit bis zu 99,9%. Durch den wilden Wettbewerb wurde der Preis in den letzten Jahren bis auf 1,35 Mark für das Kilogramm herabgedrückt, während er von 1905 bis 1907 von den vereinigten Fabriken auf 3,50 Mark gehalten worden war.

Drei Vorzüge haben dem Aluminium, sobald es billig hergestellt werden konnte, seine heutige große Verbreitung verschafft: seine Leichtigkeit, seine Widerstandsfähig-

keit gegen viele Chemikalien und seine gute elektrische Leitfähigkeit. Seine Dichte beträgt nur 2,7 (bezogen auf Wasser als Einheit); es ist also nur etwa den dritten Teil so schwer wie die anderen Metalle der Technik. Man verwendet deshalb das Aluminium, trotzdem es an Festigkeit dem Eisen keineswegs gleichkommt, zu allen solchen Geräten und Konstruktionsteilen, bei denen besondere Leichtigkeit gefordert wird, z. B. zu Feldflaschen, Helmbeschlägen, Automobilteilen und zum Bau von Luftschiffen. Trotz seiner großen Neigung, sich mit Sauerstoff zu verbinden, bleibt das Aluminium doch an der Luft blank, weil es sich mit einer sehr dünnen Oxydhaut überzieht, welche die weitere Oxydation verhindert. Auch vielen Säuren widersteht das Aluminium und wird deshalb zu Gefäßen für den Küchengebrauch und für die chemische Industrie gern verwendet. Salzsäure und Alkalien lösen es freilich rasch auf; deshalb darf man auch Aluminiumtöpfe nicht mit Soda reinigen. Aluminiumfolie hat vielfach das Stanniol verdrängt, Aluminiumpulver wird als Silberbronze gebraucht. Wegen seiner guten elektrischen Leitfähigkeit, welche zwar kleiner ist als die des Kupfers, aber doch weit größer als die des Eisens und der anderen Metalle, wird Aluminium zu Starkstromleitungen, zumal in Zeiten teurer Kupferpreise, gern angewendet; für gleiche Leistung muß der Aluminiumdraht um fast $^1/_3$ größeren Durchmesser haben, wiegt aber trotzdem nur halb soviel wie ein Kupferdraht von gleicher Leitfähigkeit. Auch zu Drahtspulen hat man neuerdings in der Elektrotechnik Aluminium verwertet; eine dünne Haut von nichtleitendem Aluminiumoxyd isoliert die einzelnen Windungen ohne besondere Umspinnung voneinander.

Als Reduktionsmittel dient Aluminium in der Eisengießerei. Man gibt dem geschmolzenen Eisen eine kleine Menge Aluminium hinzu, nimmt dadurch den in der Schmelze enthaltenen Sauerstoff hinweg und erhält einen blasenfreien Guß; das entstandene Aluminiumoxyd geht in die Schlacke über. Eine besonders interessante Verwendung hat das Aluminium in der „Aluminothermie“ gefunden, indem ein inniges Gemenge von feinverteiltem Aluminium und Eisenoxyd, wenn man es entzündet, unter gewaltiger Wärmeentwicklung Aluminiumoxyd und flüssiges Eisen ergibt. Das von Goldschmidt erfundene Verfahren dient besonders dazu, um schadhafte Stellen in großen Maschinenteilen, z. B. Schiffswellen, an Ort und Stelle auszubessern.

Von technisch wertvollen Legierungen des Aluminiums will ich hier nur die durch besondere Zähigkeit ausgezeichnete Aluminiumbronze, eine Kupferaluminiumlegierung mit 3 bis 20 % Aluminium, das Aluminiummessing, ein Messing mit 5 bis 10 % Aluminium, und das Duralumin ($^1/_2$ % Magnesium, $3^1/_2$ bis $5^1/_2$ % Kupfer, $^1/_2$ bis $^4/_5$ % Mangan) erwähnen.

MAGNESIUM. Entsprechend der älteren Aluminiumherstellung kann man auch Magnesium ohne den elektrischen Strom gewinnen, indem man seine Chlorverbindung mit metallischem Natrium schmilzt; dann entsteht Natriumchlorid und metallisches Magnesium. Auch hier wurde das chemische Verfahren durch die Elektrolyse verdrängt. Als Ausgangsmaterial dient das Doppelsalz von Chlormagnesium und Chlorkalium, das als Karnallit einen wichtigen Bestandteil der Staßfurter Salzlager bildet. Da das entwässerte Salz schon unter Rotglut flüssig wird, kann man es bequem in eisernen von außen geheizten Töpfen einschmelzen. In einer anderen Hinsicht bietet aber die Gewinnung des Magnesiums mehr Schwierigkeiten als die des Aluminiums. Da der Unterschied im spezifischen Gewicht zwischen Metall und Schmelze nicht groß ist, so verteilt sich das durch den Strom abgeschiedene Magnesium leicht in der Schmelze und geht zum Teil verloren, wenn man nicht besondere Vorkehrungen trifft, welche von den Fabriken meist geheimgehalten werden.

Angewendet wird das Magnesium in Form von Band, Draht oder Pulver zur Erzeugung des Magnesiumlichts; angezündet verbrennt nämlich das Magnesium an der Luft mit einem sehr hellen, an ultravioletten Strahlen reichem Lichte, das dem Photographen wichtige Dienste leistet. Im übrigen findet das reine Magnesiummetall, trotzdem es noch erheblich leichter ist als Aluminium und sich auch an der Luft gut hält, in der Technik keine rechte Verwendung; wohl aber spielen seine Legierungen mit Aluminium, dessen Festigkeit es erhöht, unter den Namen Magnalium, Duralumin und Elektron eine gewisse Rolle. Wegen dieser beschränkten Nachfrage hält sich auch die Magnesiumerzeugung in ziemlich engen Grenzen. In Deutschland stellt z. B. die A.-G. Griesheim-Elektron in Bitterfeld Magnesium her.

NATRIUM. Das Natriummetall, welches wegen der großen Begierde, mit der es Sauerstoff, Chlor und viele andere chemische Stoffe an sich reißt, eine wichtige Rolle in der Chemie spielt — wir haben es als mächtiges Reduktionsmittel zur Befreiung von Aluminium und Magnesium schon erwähnt — wurde seinerseits gewonnen, indem man kohlensaures Natron (entwässerte Soda) mit Kohle innig gemengt in eisernen Retorten auf Weißglut erhitzte. Auch hier bietet die Elektrolyse den bequemeren und billigeren Weg.

Freilich waren mancherlei Schwierigkeiten zu überwinden. Das billigste Ausgangsmaterial, das Natriumchlorid (Kochsalz), schmilzt erst bei guter Rotglut über 800°; bei dieser Hitze verdampft das Natrium; es müßte also über der Kathode abgefangen, bei Luftabschluß fortgeleitet und unter Petroleum kondensiert werden; auch sonst erwies sich die Zersetzung von geschmolzenem Chlornatrium bisher als unvorteilhaft. Man zieht deshalb das zwar teurere, aber schon bei 300° schmelzende Ätznatron (Natriumhydroyd) als Elektrolyten vor; aus ihm scheidet der Strom an der Anode Sauerstoffgas, an der Kathode Natriummetall und Wasserstoffgas ab. Da das Natrium leichter ist als das Ätznatron, so steigt es an die Oberfläche der Schmelze und muß dort vor dem Sauerstoff der Luft geschützt werden, damit es nicht gleich wieder verbrennt.

Der von Castner erdachte Apparat, welcher z. B. von der Niagara Electrochemical Company benutzt wird, ist in Abbildung 2 skizziert. R ist ein gußeisernes, in seinem unteren Teil verengtes Gefäß, das eingemauert ist und in seinem oberen Teil von den Heizgasen F umspült wird. Sein Boden wird von der kupfernen Kathode E durchsetzt; da der untere Teil des Kessels nicht geheizt wird, so erstarrt hier die eingefüllte Schmelze und dichtet den Boden selbsttätig ab. Die bis nahe an die Oberfläche des Bades ragende Kathode ist in ihrem oberen Teile verdickt. An dem Gefäßdeckel hängt die ringförmige Anode C aus einer Nickelsilberlegierung, welche die Kathode konzentrisch umgibt. Zwischen den Elektroden hängt eine Glocke N, deren unterer Teil aus Drahtnetz besteht; dieses hat den Zweck, das abgeschiedene Natrium von der Anode fernzuhalten. Der Deckel der Glocke darf nicht dicht schließen, damit der Wasserstoff aus ihr entweichen kann. Von Zeit zu Zeit wird der Deckel abgehoben und das an der Oberfläche angesammelte flüssige Natrium mit einem durchlöcherten Löffel ausgeschöpft; das mitgeschöpfte Ätznatron fließt durch die Löcher ab, während das geschmolzene Metall wegen seiner großen Oberflächenspannung im Löffel zurückbleibt,

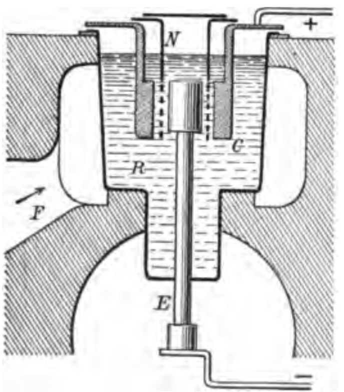


Abbildung 2. Apparat zur Natriumgewinnung.

gesammelt und zu viereckigen Stangen umgeschmolzen wird. Die Temperatur des Bades darf nicht über 330° steigen, sonst löst sich ein großer Teil des Natriums wieder in der Schmelze auf.

In der Fabrik am Niagara sind 120 solcher Tiegel aufgestellt; jeder faßt über 100 kg Ätznatron und erhält 1200 Ampere bei 5 Volt Badspannung; je 30 Tiegel sind hintereinandergeschaltet. Täglich können 3000 kg Natrium hergestellt werden. 1 kg erfordert rund 7 Kilowattstunden. Nach dem gleichen Verfahren wird in Deutschland von den Höchster Farbwerken und von der Elektrochemischen Fabrik Natrium zu Rheinfelden gearbeitet.

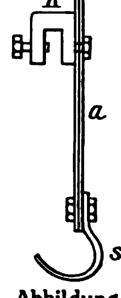


Abbildung 3. Berührungskathode.

In Bitterfeld wendet man ein ganz anderes Verfahren an, indem man mit „Berührungskathode" arbeitet. Läßt man nämlich die Kathode nicht tief in das geschmolzene Ätznatron eintauchen, sondern nur die Oberfläche berühren, so bildet sich bei richtigem Verhältnis zwischen Elektrodenquerschnitt und Stromstärke an der Berührungsstelle ein Tropfen von geschmolzenem Natrium, der immer größer wird und im geeigneten Augenblick abgeschöpft werden muß. Dieses Abschöpfen wird erleichtert, wenn man der Berührungselektrode die in Abbildung 3 dargestellte Einrichtung gibt: ein schmiedeeiserner Schuh S hängt an einem federnden Kupferband a, so daß man den Schuh zur Seite biegen kann. Mit einer Klemmschraube K wird die Elektrode an einer über dem Bade laufenden Stromschiene befestigt. Über jedem Bad hängen eine ganze Anzahl derartiger Kathoden; Arbeiter gehen von Bad zu Bad und schöpfen das ausgeschiedene Natrium ab. Die aus der Schmelze aufsteigenden Gasblasen reißen Tröpfchen Ätznatron mit sich, welche Decke und Wände mit einer weißen Schicht bekleiden, so daß der Aufenthalt in solchen Räumen nicht gerade sehr angenehm ist.

Zum Versand wird das Natrium in Blechbüchsen gepackt, die luftdicht verlötet werden; 1 kg kostet im Handel zurzeit etwa 3 Mark. Das Natrium dient als sehr starkes Reduktionsmittel in der organischen Chemie; ferner wird die Begier, mit der es Wasser an sich reißt, benutzt, um solchen Flüssigkeiten, die ihrerseits von Natrium nicht angegriffen werden, z. B. Benzol und Mineralölen, die letzten Spuren Wasser zu entziehen.

Der größte Teil des Natriums wird gleich in der Fabrik zu Natriumsuperoxyd und Zyannatrium weiterverarbeitet. Das Natriumsuperoxyd wird erhalten, indem man flache Blechkästen mit metallischem Natrium beschickt und heiße, von Wasserdampf und Kohlensäure freie Luft darüberleitet; dann bindet das Natriumatom zwei Atome Sauerstoff, und es entsteht Natriumsuperoxyd als ein hellgelbes Pulver, das die Hälfte seines Sauerstoffs leicht wieder abgibt und als Bleichmittel viel verwandt wird. In Zyannatrium wird das metallische Natrium durch Überleiten von Ammoniak und darauffolgendes Glühen mit Kohle umgewandelt. Das Zyannatrium dient ebenso wie das Zyankalium in großem Maßstabe zum Auslaugen der Golderze in Transvaal.

2. ELEKTROMETALLURGIE WÄSSERIGER LÖSUNGEN

In dem vorigen Abschnitte haben wir die Verfahren kennen gelernt, nach denen Aluminium, Magnesium und Natrium aus ihren geschmolzenen Salzen durch den elektrischen Strom abgeschieden werden. Aus wässerigen Lösungen kann man diese Metalle nicht gewinnen, weil sie sich mit Wasser sofort zersetzen. Weniger empfindliche Metalle, z. B. Zink, lassen sich dagegen auf diesem Wege aus ihren Salzen

abscheiden, wenn die Lösung nur wenig freie Säure enthält; Kupfer läßt sich sogar aus stark schwefelsaurer Kupfervitriollösung glatt niederschlagen. Die Bequemlichkeit, mit welcher sich Kupfer auf diesem Wege gleich in Form von Blechen gewinnen läßt, legt den Gedanken nahe, ob man nicht geradeswegs aus den Erzen, indem man sie mit geeigneten Säuren oder Salzen auslaugt und durch die so gewonnene Lösung den Strom schickt, das reine Metall herstellen und derart die verschiedenen Stufen der Verhüttung umgehen kann. Tatsächlich sind solche Versuche mehrfach mit Aufwand großer Mittel durchgeführt worden.

So haben Siemens & Halske aus abgeröstetem Kupferkies das Kupfer mit saurer Lösung von Eisenoxydsulfat ausgezogen, wobei das Eisen zu Oxydulsulfat reduziert wird; aus dieser Lösung schlägt der elektrische Strom an der Kathode Kupfer nieder, während das Eisen in der Lösung wieder zu Oxydsulfat oxydiert wird und abermals zum Auslaugen des Erzes dient. Dieses sinnreiche Verfahren ergab bei Versuchen in kleinem Maßstabe gute Resultate, aber im Großbetriebe traten so viel Störungen auf, daß die Sache aufgegeben wurde. Auch ein anderes Verfahren von Höpfner, welcher das Kupfererz mit Chloriden auslaugte, bewährte sich nicht.

In anderer Beziehung spielt aber die Elektrochemie bei der Metallurgie des Kupfers eine große Rolle. Das aus der Hütte kommende Kupfer enthält nämlich noch Beimengungen von anderen Metallen, welche besonders die elektrische Leitfähigkeit des Kupfers stark herabsetzen und deren Beseitigung daher für die Verwendung des Kupfers in der Elektrotechnik sehr wichtig ist. Diese Reinigung kann man in sehr vollkommenem Grade durch Elektrolyse erreichen, indem man Platten aus dem unreinen Kupfer als Anoden in Kupfervitriollösung einhängt; dann schlägt sich auf der Kathode reines „Elektrolytkupfer" nieder, während die Verunreinigungen teils als Schlamm zu Boden sinken, teils in der Lösung verbleiben. So viel Kupfer, wie an der Kathode aus der Lösung abgeschieden wird, geht an der Anode in Lösung, so daß der ganze Vorgang sich als eine Überführung des metallischen Kupfers von der einen zur anderen Elektrode darstellt. Die elektrochemische Arbeit, die hierfür aufgewendet wird, ist sehr klein, so daß der Strom vornehmlich den Leitungswiderstand im Bade zu überwinden hat. Um diesen Widerstand möglichst zu verringern, ist der Abstand der Elektroden klein, die Konzentration des Kupfersulfats und der Schwefelsäuregehalt des Bades groß und die Temperatur hoch zu wählen. Der Abstand zwischen den Anoden- und Kathodenplatten darf aber nicht zu klein sein, sonst entsteht gar zu leicht durch abbröckelnde Teile der Anode oder kristallinische Auswüchse an der Kathode Kurzschluß. Man begnügt sich deshalb in einer der größten Kupferraffinerien mit einem Abstande von 5 cm. Die zweckmäßigste Zusammensetzung des Bades beträgt etwa 16 % Kupfersulfat und 5 bis 8 % Schwefelsäure. Je höher die Temperatur, um so besser leitet die Flüssigkeit; beim Erwärmen von 20° auf 60° sinkt die Badspannung auf die Hälfte; indessen begnügt man sich mit einer Badtemperatur von 50°, weil sich bei höherem Erhitzen mehr Kupfer aus der Anode löst als niedergeschlagen wird, der Kupfergehalt der Lösung zu hoch wird und das Bad nicht mehr richtig arbeitet.

Ein anderer Faktor, der bei der Kupferraffination eine wichtige Rolle spielt, ist das Verhältnis zwischen Stromstärke und Oberfläche der Kathode; dieses als Stromdichte bezeichnete Verhältnis wird in der Technik gewöhnlich in Ampere auf das Quadratmeter angegeben.

Je größer die Stromdichte, um so rascher verläuft die Raffination und um so höher ist die tägliche Erzeugung an Elektrolytkupfer im Verhältnis zu der in den Bädern befindlichen Kupfermenge. Die Zinsen für dieses Kapital an Kupfer spielen

bei den Selbstkosten eine bedeutsame Rolle; sie betrugen z. B. in einem Falle bei 30 Ampere Stromdichte etwa $1/5$ der ganzen Betriebskosten; durch Erhöhung auf 100 Ampere wurden sie auf $1/12$ herabgedrückt, und die Betriebskosten fielen für die Tonne Kupfer von 75 auf 59 Mark.

Anderseits darf man mit der Stromdichte auch nicht zu hoch gehen, weil sonst das Kupfer nicht mehr glatt ausfällt. Man begnügt sich meist mit einer Stromdichte von 100 bis 200 Ampere auf das Quadratmeter.

Abbildung 4. Multiplenschaltung von Kupferbädern.

Als Gefäße benutzt man hölzerne Kästen von z. B. 3 m Länge, über 1 m Breite und 1 m Tiefe, die mit Blei ausgeschlagen sind. In jedem Bade hängen eine größere Zahl von Kathoden und Anoden, die parallel geschaltet sind; eine Reihe solcher Bäder werden hintereinandergeschaltet, wie Abbildung 4 andeutet.

Die zurzeit größte Kupferraffinerie, die Raritan-Werke in Perth-Amboy bei Neuyork, benutzt Bäder mit je 23 Kathoden und 22 Anoden; 400 Bäder sind hintereinandergeschaltet und werden von einer Dynamo mit Strom von 4000 Ampere bei 100 Volt Spannung gespeist. Auf jedes Bad entfällt also nur $1/4$ Volt, während bei der Schmelzelektrolyse meist mit 5 bis 6 Volt Badspannung zu rechnen war. Um Nebenschlüsse durch den Fußboden zu vermeiden, ruhen die Bäder auf freistehenden Pfeilern, die mit Glas oder glasierten Ziegeln bedeckt sind. Im ganzen sind etwa 3000 Bäder in diesen Riesenwerken im Betrieb.

Bei einer anderen großen amerikanischen Kupferraffinerie, der Anaconda-Copper-Mining Co. sind 1200 Bäder aufgestellt, die täglich 150000 kg Elektrolytkupfer liefern können.

Um die Anoden möglichst vollständig auszunutzen, gibt man ihnen zweckmäßig die in Abbildung 5 angegebene Form, so daß nur die Fahnen, an denen sie aufgehängt sind, aus dem Bade herausragen und übrigbleiben, wenn die Anode aufgezehrt wird. Eine solche Anode ist etwa 1 m breit und 50 bis 90 cm lang; ihre Dicke beträgt etwa 3 cm und ihr Gewicht gegen 180 kg. Die Anoden werden durch Gießen in Formen hergestellt. Es dauert im Betriebe etwa sechs Wochen, bis die Anoden aufgebraucht sind.

Als Kathoden dienen 2 bis 3 mm dicke Kupferbleche, die gefettet oder mit Schellack schwach überzogen werden, damit man das auf ihnen niedergeschlagene Kupfer leicht ablösen kann.

Der Strom wird den Elektroden durch Kupferschienen oder verkupferte Eisenstangen zugeführt, auf die sie sich mit ihren Aufhängefahnen stützen.

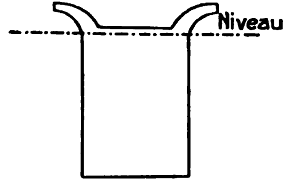


Abbildung 5. Anode aus Rohkupfer.

Wegen der großen Querschnitte, welche den Zuleitungen für so starke Ströme gegeben werden müssen, liegt in diesen Leitungen ein bedeutendes Kapital. Man sucht deshalb nach Möglichkeit die Zahl und Länge der Zuleitungen zu vermindern. In dieser Beziehung ist eine andere Schaltung der Elektroden, das sog. Seriensystem von Hayden, besonders vorteilhaft. Man setzt eine größere Anzahl von Kupferplatten in einen gemeinsamen Trog, verbindet aber nur die erste und die letzte Platte mit der Stromleitung (Abbildung 6). Dann wirken alle übrigen Platten als „Mittelleiter“, d. h. sie verhalten sich auf ihrer zur negativen Stromzuleitung hingewandten Seite als Anode, auf ihrer anderen Seite als Kathode; auf jener Seite löst

sich Kupfer, auf der anderen Seite jedes Mittelleiters schlägt sich Kupfer nieder, so daß allmählich die Platte aus rohem Kupfer in Elektrolytkupfer umgewandelt wird.

Dieses Seriensystem wird von der Kupferraffinerie in Baltimore und von der Nichols Co. in Laurel Hill bei Neuyork angewandt. Die einzelnen Platten werden in genutete Holzleisten eingeschoben und bis zu 150 in einen Trog gesetzt. Da die einzelnen Platten nur 1 cm voneinander Abstand haben, ist der Leitungswiderstand des Bades recht klein und die erforderliche Badspannung nur halb so groß wie bei dem vorhin beschriebenen „Multiplen"-System (Abbild. 4). Die Stromausbeute ist daher auch größer, und da die Rohkupferplatten wegen ihrer geringeren Dicke schon in kürzerer Zeit aufgezehrt sind, auch die im Betrieb festliegende Kupfermenge beträchtlich kleiner. Nach 12 Tagen sind die Rohkupferplatten bis auf ihre Ränder, die in den Nuten liegen, aufgezehrt, und ihre Reste lassen sich leicht von der neugebildeten Elektrolytkupferplatte abziehen. Das Seriensystem hat aber den Nachteil, daß es viel reineres Rohkupfer und eine größere Arbeiterzahl erfordert. Weil die als Mittelleiter dienenden Platten alle gleich stark und auch in dem Gefüge gleichmäßig sein müssen, werden sie nicht durch Gießen, sondern durch Walzen hergestellt, wozu sich nicht jedes Kupfer eignet. Auch die Gefäße sind teurer, da sie innen nicht leiten dürfen, also das Auskleiden mit dem widerstandsfähigen Blei nicht in Frage kommt. In Baltimore setzt man die Gefäße aus Schieferplatten zusammen und streicht sie mit Teer aus.

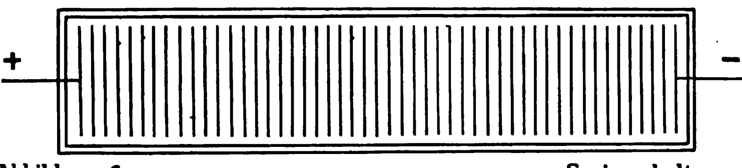


Abbildung 6. Serienschaltung.

Während der Elektrolyse verschlechtert sich die Badflüssigkeit, indem sie Arsen, Antimon und andere Verunreinigungen des Rohkupfers aufnimmt; sie muß daher nach angemessener Zeit aufgearbeitet werden. Zu diesem Zwecke stumpft man die freie Säure mit Kupferoxyd ab und bläst Luft ein, wodurch die genannten Verunreinigungen ausgefällt werden; beim Eindampfen der gereinigten Lauge gewinnt man den auskristallisierenden Kupfervitriol.

Der sich am Boden der Gefäße absetzende Anodenschlamm ist wegen seines Gehalts an edlen Metallen sehr geschätzt und wird sorgfältig aufgearbeitet. Aus einem Anodenkupfer, das z. B. 0,034 % Silber und 0,0014 % Gold enthielt, wurde ein Schlamm mit 54 % Silber und 0,39 % Gold erhalten. In Anaconda gewinnt man aus solchem Anodenschlamm monatlich etwa 11 000 kg Silber und 50 kg Gold.

Schon die Gewinnung dieser sich im Schlamm anhäufenden Edelmetalle kann die Kupferraffination gewinnbringend gestalten. Insgesamt wurden in den Vereinigten Staaten bereits vor zehn Jahren 230 000 t Elektrolytkupfer erzeugt und nebenbei aus dem Anodenschlamm 750 000 kg Silber und 9500 kg Gold gewonnen. 1907 sind in Amerika rund 400000 t Kupfer elektrolytisch raffiniert worden; das sind etwa 80 % der gesamten dortigen Kupferproduktion. Deutschland besitzt größere Kupferraffinerien in Mansfeld, Oker und Hamburg.

ELEKTROLYTISCHE SILBERRAFFINATION. Wie das Kupfer so kann man auch das Silber durch Elektrolyse in größter Reinheit gewinnen. Um die Ausbildung der elektrischen Silberraffination hat sich besonders Möbius verdient gemacht. Als Bad dient eine 0,5 bis 1 prozentige Silbernitratlösung, die mit höchstens 1 % Salpetersäure angesäuert ist. Der geringe Silbergehalt des Bades gewährt den Vorteil, daß nicht

zu große Mengen des wertvollen Metalls im Betriebe festgelegt und daher die Silberzinsen verhältnismäßig niedrig sind. Die Abscheidung des Silbers unterscheidet sich jedoch in einer Hinsicht ungünstig von der des Kupfers, nämlich darin, daß das Silber nicht in fester Schicht, sondern vornehmlich in ziemlich losen Kristallen auf der Kathode ausfällt. Damit diese verzweigten Kristallbäume keinen Kurzschluß verursachen, muß eine besondere Vorrichtung eingebaut werden, welche die anschießenden Kristalle periodisch beseitigt.

Zu diesem Zwecke ordnete Möbius zwischen den Elektroden hölzerne Latten an, die von einem Mechanismus ständig hin und her bewegt werden. Bei ihrer Bewegung streifen sie die Silberkristalle ab, und diese fallen auf einen herausnehmbaren Siebboden. Damit der von den Anoden abfallende Schlamm sich diesen reinen Silberkristallen nicht beimischt, stecken die Anoden in Beuteln aus Segeltuch, in denen der goldhaltige Anodenschlamm zurückbleibt. Einmal am Tage wird der Siebboden mit dem angesammelten Silber herausgenommen und entleert. Die Kriställchen werden gewaschen, gepreßt, getrocknet und eingeschmolzen; ihr Feingehalt ist 996 bis 999,5. Die Anoden, welche aus Rohsilber von etwa 95% Silbergehalt bestehen, sind 6 bis 10 mm dick und werden bei einer Stromdichte von 200 Ampere in etwa zwei Tagen gelöst. Die Kathoden bestehen aus dünnen Feinsilberblechen. Eine größere Anzahl von Zellen, deren jede vier Reihen von Kathoden und drei Reihen von Anoden enthält, sind, durch Querwände geschieden, in einem gemeinsamen Bottich vereinigt.

In Deutschland wird nach diesem Verfahren von der Deutschen Gold- und Silberscheideanstalt zu Frankfurt a. M. und von der Norddeutschen Affinerie in Hamburg gearbeitet. Die Deutsche Gold- und Silberscheideanstalt kann täglich 1000 kg Silber raffinieren. Viel leistungsfähiger ist die amerikanische Anlage in Maurers, welche die fünffache Menge verarbeiten kann; auf 1000 kg Feinsilber werden dort etwa 6 kg Gold erhalten.

Die Raritan-Kupferwerke raffinieren ihr Silber, das sie bei der Kupferraffination erhalten, elektrolytisch nach einem anderen, von Balbach erfundenen Verfahren, das sich vor dem Möbiusschen durch größere Einfachheit der Apparatur auszeichnet. Die Elektroden sind wagerecht angeordnet; auf dem Boden eines flachen Porzellantroges liegt eine Kohlenplatte als Kathode, darüber auf einem hölzernen Rost, der mit Filtertuch bedeckt ist, die Rohsilberanode. Die auf den Kohlenplatten lose abgeschiedenen Silberkristalle werden von Zeit zu Zeit mit Krücken herausgeholt. In den Raritan-Werken sind 150 solcher Bäder aufgestellt.

GOLDRAFFINATION. Das Rohgold enthält gewöhnlich Blei, Silber und Platinmetalle. Man reinigt es durch Elektrolyse in einer salzsauren Lösung von Chlorgold, die etwa 30 g Gold im Liter enthält und auf 50 bis 70° erwärmt ist. Als Gefäße dienen flache Porzellanwannen. Als Kathoden dienen sehr dünne Feingoldbleche. Das abgeschiedene Gold enthält höchstens 0,02% Verunreinigungen. Größere Anlagen zur Goldraffination befinden sich in Hamburg und Frankfurt a. M. Die neue Münze der Vereinigten Staaten zu Philadelphia besitzt seit einigen Jahren auch eine modern eingerichtete Goldraffinerie, in der täglich rund 200 kg Feingold erzeugt werden können. Das im Gold enthaltene Silber fällt im Bade als Chlorsilber aus, Blei und Platinmetalle gehen in Lösung. Hat sich das Bad zu sehr an Platin angereichert, so muß die Flüssigkeit erneuert werden. Die Stromdichte darf 1000 Ampere betragen; der Aufwand an elektrischer Energie ist sehr klein und kostet z. B. in Philadelphia für das Kilogramm Gold nur etwa 4 Pfennig. Eine andere

derartige Anlage befindet sich in der Münze zu San Franzisko. Als Nebenprodukt werden in diesen Staatsbetrieben jährlich für etwa 200000 Mark Platin gewonnen.

ELEKTROLYTISCHE GOLDGEWINNUNG AUS GOLDERZEN. Während die elektrochemische Verarbeitung von Kupfererzen sich im Großbetriebe bisher nicht bewährt hat, leistet die Elektrolyse bei der Verarbeitung von Golderzen im Gegenteil gute Dienste. Aus den feingepulverten Golderzen läßt sich mit Quecksilber nur ein Teil des Goldes herausziehen, z. B. aus einem Erz, das in 1000 kg 18 g Gold enthält, nur etwa die Hälfte (9,4 g). Indem man unter Luftzutritt mit Zyankaliumlösung auslaugt und dann das Gold elektrolytisch abscheidet, gelingt es, noch etwa 6 g zu gewinnen, so daß nur etwa 1/7 der gesamten Goldmenge verloren geht. Als Anoden dienen Eisenbleche, als Kathoden dünne Bleibleche, an denen die Lauge langsam vorbeigeführt wird. Die Stromdichte muß sehr klein sein (nur 1/2 Ampere auf das Quadratmeter), weil sich sonst das Gold in Flittern ausscheidet, abfällt und sich in der Lauge wieder löst. Nachdem etwa 80% des in der Lauge enthaltenen Goldes abgeschieden sind, wird die Lauge wieder aufgefrischt und von neuem zum Ausziehen des Erzes benutzt. Die mit Gold bedeckten Bleibleche werden eingeschmolzen und das Blei abgetrieben. Das erhaltene Rohgold hat einen Feingehalt von rund 900; es wird nach dem oben beschriebenen Verfahren raffiniert. Der Verbrauch an Blei beträgt auf 1000 t Erz etwa 100 kg; die beim Abtreiben erhaltene Bleiglätte wird wieder zu Blei reduziert und zu neuen Kathoden verwendet. Die Stromausbeute ist sehr schlecht und beträgt meist weniger als 1%. Bei dem hohen Wert des Goldes kommt aber der Kraftpreis nicht so sehr in Frage wie bei den unedlen Metallen.

Nach dem Zyanidverfahren wurden in Transvaal schon für mehrere hundert Millionen Mark Gold gewonnen. Die Gesamtkosten betragen für 1 t Erz weniger als 30 Mark. Man kann auf diese Weise Golderze verarbeiten, die wegen ihres zu geringen Goldgehalts früher vernachlässigt werden mußten.

Auch Blei, Zink und Nickel raffiniert man elektrolytisch mit Hilfe geeigneter Lösungen. So werden z. B. von den Canadian Smelting Works in Trail (Kanada) täglich große Mengen sehr reinen Elektrolytbleies aus kieselfluorwasserstoffsaurer Lösung gewonnen. Von Bedeutung ist auch die elektrolytische Entzinnung von Weißblechabfällen; man löst von ihnen das Zinn ab, indem man sie in alkalischem Bade als Anoden schaltet.

3. GALVANOPLASTIK UND GALVANOSTEGIE

HERSTELLUNG NAHTLOSER ROHRE. Hebt man eine elektrolytisch gewonnene Metallschicht von der Kathode ab, so gibt sie, wenn man richtig gearbeitet hat, die Oberflächenform dieser Unterlage getreulich wieder. Man benutzt dieses Verfahren, um größere und kleinere Gegenstände nachzubilden. Benutzt man z. B. eine zylindrische Kathode, schlägt auf ihr eine Kupferschicht nieder und zieht diese dann ab, so erhält man ein nahtloses Rohr. Wenn man die Kathode rasch rotieren läßt, so darf man hierbei hohe Stromdichten anwenden und kann in verhältnismäßig kurzer Zeit Rohre von genügender Wandstärke gewinnen. Um das abgeschiedene Kupfer zu glätten, preßt man nach dem Verfahren von Elmore Poliersteine aus Achat gegen die sich drehende Kathode. Cowper-Coles zeigte, daß man auch ohne dies Hilfsmittel dichte Niederschläge erhält, wenn man die Umfangsgeschwindigkeit auf 500 bis 700 m in der Minute steigert. Dank der hohen Drehungsgeschwindigkeit werden auch Verunreinigungen, die

sich auf der Kathode schwammig abscheiden, abgeschleudert, so daß man ziemlich unreine Kupferlösungen und Rohkupferanoden verwenden und derart die Raffination des Kupfers mit der Rohrerzeugung gleich vereinigen kann. Nach dem Verfahren von Cowper-Coles werden auch weite Kupferzylinder für den Zeugdruck hergestellt. In einem besonderen drehbankartigen Apparat wird durch Anpressen einer Walze der Kupferniederschlag etwas gedehnt, so daß sich der Zylinder leicht von der Unterlage abziehen läßt. Um Kupferplatten zu gewinnen, schneidet man die Zylinder längs einer Mantellinie auf und biegt sie auseinander, oder man legt gleich auf der Oberfläche der als Kathode dienenden Walze einen nichtleitenden Streifen ein. Drähte und Bänder werden gewonnen, indem man die Walzenoberfläche spiralig mit scharfkantigen Rillen versieht, dann läßt sich das niedergeschlagene Kupfer als langer Streifen abwickeln. Auch Eisenrohre stellt Cowper-Coles elektrolytisch her, indem er auf einen leitenden Kern, der vorher mit Blei überzogen war, das Eisen aus einer heißen kresylschwefelsauren Eisenlösung niederschlägt, der etwas Schwefelkohlenstoff zugesetzt ist. Hat die Eisenschicht genügende Dicke erreicht, so nimmt man die Kathode heraus, erhitzt bis zum Schmelzen des Bleies und kann den Kern leicht aus dem Rohr herausziehen. Als Ausgangsmaterial dient Eisenschrott oder sogar feingepulvertes Eisenerz. Nach Angabe des Erfinders kostet die Tonne Elektrolyteisen wenig über 100 Mark.

HERSTELLUNG VON METALLFOLIEN. Ebenso wie dickere Bleche kann man auch durch Elektrolyse sehr dünne Metallblätter herstellen, die für sich oder mit Papier hinterklebt in den Handel kommen. Nach einer älteren Angabe von Pfannhauser werden zu diesem Zwecke in der Galvanischen Metallpapierfabrik vormals Landauer & Ko. in Wien auf hochpolierte Platten aus Messing oder Neusilber hauchdünne Schichten von Kupfer, Nickel, Silber oder Gold niedergeschlagen; dann werden die Platten herausgenommen, getrocknet, mit Papier überklebt und schließlich die Metallpapiere vorsichtig abgelöst. Für die herausgehobenen Kathoden werden sofort neue Platten eingehängt. Will man nicht mit Papier hinterkleben, so läßt man die Metallhaut etwas stärker werden. Bei der Herstellung von Gold- und Silberpapier wird das Edelmetall gewöhnlich durch einen Niederschlag von Kupfer oder Messing verstärkt.

In stetigem Prozeß erzeugt Cowper-Coles Metallfolien, indem er als Kathode ein endloses Metallband oder neuerdings eine rotierende Trommel benutzt, von welcher die Metallhaut auf ein vorbeibewegtes Papierband übertragen wird.

GALVANOPLASTISCHE HERSTELLUNG VON KLISCHEES. Eine sehr wichtige Rolle spielt die elektrolytische Metallfällung in den graphischen Gewerben bei der Herstellung von Klischees für den Buch- und Illustrationsdruck. Zuerst stellt man von dem Original (Holzschnitt, Autotypie, Schriftsatz usw.) ein Negativ her und schlägt dann auf diese Form (Matrize oder Mater genannt) eine dünne Kupferschicht elektrolytisch nieder, welche alle Einzelheiten des Urbildes wiedergibt und, nachdem sie zur Verstärkung mit Blei hintergossen ist, als Druckplatte dient. Als Matrizenmaterial dient Guttapercha, Wachs oder Blei. Die Guttapercha wird durch Einlegen in heißes Wasser erweicht, auf die mit Graphit eingeriebene Bildfläche der Form gelegt und dann in die Prägepresse gebracht. Wachsplatten eignen sich besonders zum Abformen sehr zarter Zeichnungen, müssen aber vorsichtiger behandelt werden. Das Abformen in Blei liefert gleich ohne Einreiben mit Graphit eine leitende Matrize, ist aber erst durch Dr. Albert 1903 zu einem gut brauchbaren Verfahren ausgebildet worden.

Zur Stromzuleitung bohrt man in den Rand von Guttaperchamatrizen Löcher und zieht Kupferdraht hindurch, mit dem die Matrize an die Stromschiene aufgehängt

wird. Dünne Kupferdrähte, sogenannte Fühler, erleichtern die Stromzufuhr nach den unteren Teilen der mit Graphit eingeriebenen Form. Die Verbindungsstellen werden besonders mit Graphit eingebürstet. Statt der Aufhängedrähte benutzt man namentlich bei Wachsmatern kleine Kupferplatten, die man am oberen Rand der Mater einschmilzt. Da Guttapercha und Wachs leichter als Wasser sind, so werden die Formen mit Bleistücken auf ihrer Rückseite beschwert. Um den Kupferniederschlag auf die Bildfläche zu begrenzen, kann man den Rand der Form durch Leisten aus Glas, Hartgummi oder Zelluloid abblenden. Vor dem Einhängen in das Bad wird die Matrize abgeblasen, um jedes lose Graphitstäubchen zu entfernen, und durch Übergießen mit Alkohol entfettet.

Das elektrolytische Bad besteht aus einer 20prozentigen Kupfersulfatlösung, die mit 3 % Schwefelsäure angesäuert ist. Um einen gleichmäßigen feinen Kupferniederschlag zu erzielen, ist bei ruhendem Bade die Stromdichte auf 1 bis 2 Ampere, bei bewegtem Bade auf 2 bis 3 Ampere für das Quadratdezimeter zu bemessen. Für alle Zwecke der Graphik genügt eine Dicke der Kupferschicht von 0,18 mm, zu deren Ausbildung bei 1 Ampere Stromdichte etwa 14 Stunden gebraucht werden; oft begnügt man sich aus Sparsamkeitsgründen mit einer Stärke von kaum 0,1 mm. Will man größere Stromdichte anwenden und dadurch beträchtlich an Zeit sparen, so bewegt man die Badflüssigkeit entweder durch eine Rührvorrichtung oder durch Einblasen von Luft oder indem man die Flüssigkeit mit Hilfe einer Pumpe durch mehrere treppenartig aneinandergebaute Bäder kreisen läßt.

Bei sehr guter Rührung kann man auch in höchst konzentrierter schwachsaurer Kupfersulfatlösung, die auf 25 bis 28° erwärmt ist, mit 6 Ampere auf das qdcm noch gute Niederschläge erhalten und schon in 2 Stunden brauchbare Klischees erzeugen. Das bei dieser Schnellgalvanoplastik, welche durch Polenz 1902 eingeführt wurde, erhaltene Kupfer ist etwas härter als jenes, welches aus dem gewöhnlichen Bade niedergeschlagen wird.

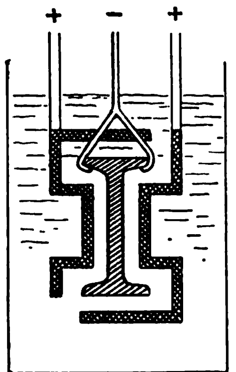
Da jedes Staubkörnchen und jedes von der Anode abfallende Kupferteilchen, wenn es an die Kathode gerät, das Klischee verderben könnte, so wird das Bad bei der Zirkulation immer wieder filtriert, und die aus reinstem Elektrolytkupfer bestehenden Anoden sind in einen dichten Stoff eingenäht. Die Oberfläche der Anoden ist jener der Kathoden gleich; ihr Abstand beträgt bei flachen Matrizen 5 bis 8 mm, sonst mehr.

Nachdem sich auf den Matern eine Kupferschicht von genügender Dicke abgeschieden hat, hebt man sie aus dem Bade, spült sie, schneidet mit dem Messer, wenn nötig, das Kupfer ab, welches über den Rand gewachsen ist, und trennt dann die Kupferplatte von der Form, indem man von einer Ecke aus vorsichtig eine dünne, stumpfe Messerklinge oder dergleichen einschiebt. Wachsmatern können durch Abschmelzen entfernt werden.

Die galvanoplastische Nachbildung von Büsten usw. geht ähnlich vor sich; nur die Herstellung der Matrizen macht bei stark unterschnittenen Gegenständen mehr oder minder große Mühe. Die einzelnen Teile der Form werden dann meist getrennt in das Bad eingehängt und die erhaltenen Kupferplatten durch Lötnähte vereinigt.

GALVANOSTEGIE. Unter Galvanostegie versteht man die Kunst, metallische Gegenstände elektrolytisch mit einer dünnen Schicht eines wertvolleren Metalls zu bekleiden, um sie chemisch widerstandsfähiger zu machen und um ihnen ein schönes Aussehen zu verleihen. So schützt man z. B. Eisen vor dem Rosten durch eine Decke aus Zink, Kupfer oder Nickel. Damit eine solche Deckschicht auf der Unterlage gut

hafte, muß diese vollkommen frei von Oxyd und Fett sein. Legt man Wert auf einen glatten Überzug, so müssen vorher alle Unebenheiten der zu bekleidenden Fläche abgeschliffen werden; auch Poren und Risse dürfen nicht vorhanden sein, weil sie von dem abgeschiedenen Metall nicht ausgeglichen werden, sondern im Gegenteil in der Deckschicht stärker hervortreten. Soll der fertige Gegenstand eine matte Oberfläche haben, so ist er vor dem Galvanisieren zu mattieren; soll er Hochglanz zeigen, so muß er auch vorher auf Hochglanz poliert werden.



Abbild. 7. Profilanode zur Verzinkung von T-Eisen.

Zum Verzinken des Eisens dient eine Zinksulfatlösung, welche mindestens 40 bis 60 g Zink im Liter enthalten soll; die Stromdichte darf nicht unter 1 Ampere auf den qdm sinken. Werden diese Bedingungen nicht eingehalten, so scheidet sich das Zink schwammig ab; der gleiche Mißerfolg tritt auch ein, wenn die Badflüssigkeit durch Kupfer verunreinigt ist. Um das Eisen wirksam vor Rost zu schützen, darf der Zinküberzug nicht zu dünn sein. Man pflegt in der Praxis auf das Quadratmeter 45 bis 300 g Zink niederzuschlagen, was einer Dicke von 0,006 bis 0,043 mm entspricht; je stärker der Zinkniederschlag, um so besser schützt er natürlich. Dieses Verzinken wird bei Eisenblechen, Röhren und Drähten in größtem Maßstabe durchgeführt.

Die Eisenbleche werden zunächst durch heiße Lauge entfettet, dann in verdünnter Säure gebeizt und drittens von dem durch das Beizen gelockerten Glühspahn durch Scheuern mit Schamottesteinen und Sand befreit. Nach dieser Vorbereitung werden die meist 2 m langen und 1 m breiten Bleche an Klammern in das Zinkbad eingehängt, welches auf 40 bis 45° erwärmt und tüchtig gerührt wird. Dann erhält man mit 2½ Ampere Stromdichte in 20 bis 25 Minuten eine genügende Zinkschicht. Um die Bleche bequemer zu handhaben, sind die etwa 1,2 m hohen Bäder halb in den Fußboden versenkt. In jedem Bade hängen 3 Bleche zwischen 4 Zinkanoden, so daß sie gleichzeitig auf beiden Seiten verzinkt werden; je 4 Bäder sind hintereinandergeschaltet und werden von einer Dynamo bei 12 Volt Klemmenspannung mit 3000 Ampere versorgt. Mit einer solchen Anlage können in 24 Stunden über 800 Bleche verzinkt werden. Die aus dem Bade gehobenen Bleche werden in Wasser gespült, darauf einige Minuten in kochendes Wasser getaucht und dann zum Trocknen aufgehängt; die heißen Bleche trocknen in wenigen Minuten. Der Zinkniederschlag ist hellgrau und samtartig; soll er glänzen, so kratzt man ihn trocken mit Stahldrahtbürsten.

Um Röhren zu verzinken, legt man sie zu 4 bis 8 Stück auf ein Gerüst, welches gleichzeitig den Strom zuleitet. Um das Zink gleichmäßig auf die Rohroberfläche zu verteilen, ist es zweckmäßig, die Rohre zu drehen. Um T-Eisen gleichmäßig zu verzinken, muß man Anoden anwenden, welche sich diesem Profil anpassen, wie Abbildung 7 zeigt. Solche Profilanoden werden durch Biegen von Zinkblechen oder durch Gießen hergestellt. Damit das Bad gut „in die Tiefen arbeitet", ist ein Zusatz von Dextrose oder von Pyridin zweckmäßig.

Drähte, Stahlbänder und Litzen zu verzinken erfordert besondere Einrichtungen. Die Ringe blankgezogener Eisendrähte werden gleich nach dem Ziehen auf eine drehbare Welle gesteckt und mit dieser in heiße Natronlauge getaucht. Der sich abwickelnde Draht wandert aus der Lauge zwischen einigen mit dünnem Kalkbrei bedeckten Filzwalzen hindurch unter eine Wasserbrause und tritt dann über eine

Metallrolle, die ihm gleichzeitig den Strom zuleitet, in das Verzinkungsbad ein. Über und unter den parallelen Reihen der durch das Bad laufenden Drähte sind Zinkanoden angeordnet. Die Bäder sind 6 bis 8 m lang, in ihnen verweilt Draht von 1 mm Durchmesser etwa 1 Minute; für dünneren Draht kann man die Geschwindigkeit bis auf 18 m in der Minute steigern, dickerer Draht muß entsprechend langsamer wandern. Aus dem Zinkbade gelangt der Draht in einen Behälter mit kochendem Wasser und wird dann aufgehaspelt.

Kleineisenzeug (Schrauben, Muttern, Nägel usw.) wird im Sandstrahlgebläse oder in Scheuertrommeln mit scharfem nassem Sande gereinigt und dann sofort verzinkt. Zur Massengalvanisierung solcher kleinen Gegenstände dienen Siebe oder Trommeln oder Schaukelapparate, wie Abbildung 8 einen solchen zeigt, der von Dr. G. Langbein & Ko. in Leipzig gebaut wird. Eine aus nichtleitendem Material gebaute Halbtrommel, in welche Kupferstreifen als negative Stromzuleitung eingelassen sind, schwingt um eine feste Anode, wodurch die Waren in der Trommel herumgewälzt und so auf ihrer ganzen Oberfläche gleichmäßig verzinkt werden. In diesem Apparat lassen sich über 20 kg Nägel auf einmal verzinken.



Abbildung 8. Großer Schaukelapparat der Langbein-Pfanhauser Werke A.-G., Leipzig-Sellerhausen.

Zum Verkupfern des Eisens dient eine zyankalische Kupferlösung, aus der sich bei mäßiger Stromdichte das Kupfer feinkörnig und gleichmäßig abscheidet.

Aus einem Zyankalibad, welches Kupfer und Zink in bestimmtem Verhältnis enthält, kann man unter genau innezuhaltenden Bedingungen beide Metalle zusammen als Messing abscheiden. Bei gegebenem Bade hängt der Kupfergehalt und damit die Farbe des Niederschlags von der Stromdichte ab; bei niederer Stromdichte wird er rötlicher. Als Anoden dienen bei der Vermessingung gegossene Messingplatten.

Zum Verzinnen benutzt man alkalische Zinnbäder, aus denen sich bei mäßiger Stromdichte und nicht zu tiefer Temperatur das Zinn schön abscheidet. Eisenwaren verkupfert man vorher oder überzieht sie mit einer dünnen Zinnschicht, indem man sie mit Zinkdraht umwickelt und in eine siedendheiße Zinnlösung einhängt; der zwischen dem Zink und dem Eisen entstehende galvanische Strom scheidet dann Zinn auf dem Eisen ab, während sich Zink löst. Diese Kontaktgalvanisierung wird auch zur Erzeugung anderer dünner Metallniederschläge benutzt, indem man die Waren in Berührung mit einem unedleren Metall, z. B. in einem Sieb aus Aluminium, in geeignete Lösungen der auszufällenden Metalle einhängt.

Besseren Massenartikeln pflegt man durch Vernickeln eine schöne und widerstandsfähige Oberfläche zu verleihen. Es ist aber nicht ganz einfach, einen guten

Nickelniederschlag zu erzeugen, weil das elektrolytisch ausgeschiedene Nickel, wenn es Eisen enthält, spröde ist, zum Abblättern neigt und leicht fleckig wird. Unter den zahlreichen Vorschriften für Nickelbäder ist eine der einfachsten das Rezept von Langbein, der in 1 l Wasser 50 g Nickelammoniumsulfat und ebensoviel Ammoniumsulfat auflöst; er empfiehlt eine Stromdichte von 0,35 Ampere. Damit das Bad richtig arbeitet, muß es stets schwach sauer sein. Da der elektrische Strom im Bade immer den nächsten Weg zwischen den Elektroden bevorzugt, so bleiben Vertiefungen in den Waren leicht ohne genügenden Überzug, wenn man nicht eine kleine Hilfsanode in sie einführt. Umgekehrt ist bei manchen Waren eine ungleichmäßige Dicke der Nickelschicht erwünscht, z. B. sollen die Schneiden und Spitzen von Messern nur dünn vernickelt werden, damit sie scharf bleiben. Dies erreicht man dadurch, daß man die Messerschneiden von der Anode abwendet, so daß an ihnen die Stromdichte und damit die vom Strom niedergeschlagene Metallmenge viel kleiner wird als an den Messerrücken, welche der Anode zugekehrt sind.

Das Versilbern und Vergolden von Metallwaren ist der älteste Zweig der Elektrometallurgie. Zum Versilbern dient nach Langbein eine Lösung von 20 g Kaliumsilberzyanid und 10 g Zyankalium in 1 l Wasser bei einer Stromdichte von 0,3 Ampere. Will man stark versilbern, so muß der Silbergehalt des Bades höher sein als angegeben. Damit der Niederschlag nicht durch Rillen oder Knospen verunstaltet wird, bewegt man die Stangen, an denen die Waren aufgehängt sind, ständig durch eine Exzentervorrichtung. Kupferne Gegenstände werden vorher verquickt, indem man sie einige Sekunden in eine Lösung von Zyanquecksilber taucht — bei zu langem Eintauchen scheidet sich zuviel Quecksilber ab, das die Ware brüchig machen würde —, um das Silber besser haften zu lassen. Britanniametall muß man erst verkupfern und verquicken, weil sonst der Silberniederschlag sich nachträglich beim Andrücken des Polierstahls ablösen würde. Da ferner auf hochpolierten Flächen das Silber schlecht haftet, so muß man einen zu glatten Untergrund mit Bimsteinpulver aufrauhen.

In das Bad werden die Waren an Silberdrähten eingehängt und zunächst einige Minuten lang mit starkem Strom „gedeckt", dann arbeitet man etwa 1/4 Stunde mit normaler Stromdichte, hebt nun die Waren heraus, kratzt sie mit Bürsten und versilbert dann weiter.

Beim Versilbern von Gebrauchsgegenständen, wie Bestecke, werden gewisse Teile, z. B. die Spitzen von Gabeln, welche sich rasch abnutzen, stärker versilbert. Dies erreicht man dadurch, daß man nach einer gewissen Zeit das Versilbern unterbricht, alle anderen Stellen der Gegenstände mit einem isolierenden Lack überzieht und dann weiter versilbert; oder indem man zwischen Anode und Kathode Platten aus nichtleitender Masse, z. B. Zelluloid, einhängt, welche mit passenden Ausschnitten versehen sind und auf diese Weise die Stromlinien von den weniger stark zu versilbernden Teilen ablenken.

Um die durch den Strom abgeschiedene Silbermenge genau zu begrenzen, schaltet man in den Weg des Stromes eine „metallometrische Wage", an deren Balken eine Kathode hängt; sobald diese durch das auf ihr abgeschiedene Silber um ein bestimmtes Gewicht schwerer geworden ist, schlägt der Balken aus und unterbricht den Strom.

Zum Vergolden dient eine zyankalische Lösung, welche im Liter nur 1 g Feingold zu enthalten braucht. Daß man bei so geringem Goldgehalt arbeiten kann, ist bei dem hohen Preise des Goldes ein großer Vorteil. Wegen der Kostbarkeit des

Metalls schlägt man auch gewöhnlich nur eine sehr dünne Goldschicht nieder. Silber und Kupfer vergoldet man ohne weiteres; andere Metalle überzieht man erst mit Kupfer oder Messing. Durch gewisse Zusätze zum Bade kann man die Farbe des Niederschlages ändern; Kupferzusatz gibt rote, Silber hellgrüne, eine Spur Arsen dazu dunkelgrüne, gelbes Blutlaugensalz und Soda rosa Vergoldung.

Gar zu dünne galvanische Überzüge sind naturgemäß nicht sehr dauerhaft, zumal sie meist zahlreiche winzige Poren besitzen. In dieser Hinsicht besitzt das allerdings teurere Aufwalzen einer edlen Deckschicht, das Plattieren, den Vorzug. Ebenso rosten die nur dünn galvanisch verzinkten oder verzinnten Eisendrähte leichter als jene, die ihre Deckschicht durch Eintauchen in geschmolzenes Metall erhalten haben. Aber wenn man nur eine genügend dicke Zinkschicht durch den Strom niederschlägt, erhält man eine ebenso widerstandsfähige Schutzdecke wie bei der heißen Verzinkung und spart dabei immer noch beträchtlich an Metall.

4. ELEKTROLYTISCHE GEWINNUNG VON SAUERSTOFF UND WASSERSTOFF

Nachdem wir im vorhergehenden uns mit der Elektrometallurgie befaßt haben, wollen wir nun die anderen technischen Anwendungen der Elektrolyse kennen lernen, soweit es der knappe Raum gestattet, und zwar zunächst die elektrolytische Wasserzersetzung. Leitet man durch angesäuertes oder alkalisch gemachtes Wasser den elektrischen Strom, so entwickelt sich an der Kathode Wasserstoffgas, an der Anode Sauerstoffgas, und zwar dem Volumen nach doppelt soviel Wasserstoff als Sauerstoff. Das Gemenge dieser beiden Gase — Knallgas — liefert bei der Verbrennung in einem passend konstruierten Gebläsebrenner eine außerordentlich hohe Temperatur, welche schon seit langem zum Schmelzen von Platin und, seitdem der Preis billig geworden ist, in großem Maßstabe zum Schweißen und zum Zerschneiden von Eisenteilen dient.

In den „Elektrolyseuren" zur elektrolytischen Gewinnung von Wasserstoff und Sauerstoff nach dem System Schuckert dient als Badflüssigkeit 20prozentige Natronlauge; die Elektroden bestehen aus Eisenplatten und sind in gußeiserne Wannen gasdicht eingebaut. Damit sich der an der Kathode entwickelte Wasserstoff nicht mit dem an der Anode freiwerdenden Sauerstoff zu dem gefährlichen Knallgas vermischt, sind Scheidewände eingefügt, welche schmale Glocken zum getrennten Auffangen der beiden Gase bilden und oben mit Rohrleitungen verbunden sind. Abbildung 9 zeigt einen solchen Elektrolyseur, Abbildung 10 eine große Anzahl solcher Apparate, die zu einer in 24 Stunden 1200 cbm Wasserstoff und 600 cbm Sauerstoff liefernden Anlage vereinigt sind. Der Elektrolyseur erfordert bei normalem Betriebe je nach seiner Größe 10 bis 1000 Ampere. Die Badspannung ist um so kleiner, je höher die Temperatur; bei 70° beträgt sie etwa 3 Volt. Da eine Verringerung der



Abbildung 9. Elektrolyseur, System „Schuckert".



Abbildung 10. Elektrolytische Anlage „System Schuckert" zur Gewinnung von 1200 cbm Wasserstoff und 600 cbm Sauerstoff innerhalb 24 Stunden. (Seit 1902 in Dauerbetrieb.)

erforderlichen Spannung eine entsprechende Ersparnis an elektrischer Energie bedeutet, so arbeitet man nicht bei Zimmertemperatur, sondern bei 50 bis 60°; diese Temperatur stellt sich von selbst beim Betriebe ein, wenn man die Bäder, um die in ihnen erzeugte Stromwärme zusammenzuhalten, mit Sand umgeben in Holzkasten setzt, welche auf Porzellanfüßen stehen. Unter diesen Umständen verbraucht man zur Gewinnung von 1 cbm Wasserstoff und ½ cbm Sauerstoff 6 bis 7 Kilowattstunden.

5. ELEKTROLYTISCHE HERSTELLUNG VON BLEICHLAUGEN

Zum Bleichen benutzt man meist eine Auflösung von Chlorkalk, der chemisch als unterchlorigsaurer Kalk anzusehen ist, oder auch eine Lösung von unterchlorigsaurem Natron (Natriumhypochlorit), die als Eau de Javelle durch Einleiten von Chlorgas in Sodalösung hergestellt wird. Auf elektrochemischem Wege erhält man in sehr einfacher Weise eine verdünnte Bleichlauge, indem man eine Kochsalzlösung durch den Strom zerlegt. Dann entsteht zunächst an der Kathode Natronlauge, an der Anode Chlor, durch deren Wechselwirkung bei Zimmertemperatur Natriumhypochlorit gebildet wird.

Die von der Elektrizitäts-Gesellschaft Haas & Stahl in Aue i. S. gebauten „Bleichelektrolyseure" enthalten als Elektroden Kohleplatten, die nach dem Mittel-

leitersystem hintereinandergeschaltet und mit dem sie zusammenhaltenden Rahmen in einen großen, mit Kochsalzlösung beschickten Trog eingesetzt sind. Da bei der Herstellung von Bleichlaugen Temperaturerhöhung der Ausbeute schadet, so muß die durch den Strom erzeugte Wärme durch Kühlung und gute Zirkulation der Badflüssigkeit möglichst beseitigt werden. Das Bewegen der Flüssigkeit wird beim System Haas-Dr. Oettel durch das auf den Kathodenflächen entwickelte Wasserstoffgas besorgt, welches in den schmalen Räumen zwischen den Kohleplatten emporsteigt und überschäumend Lauge hochhebt, die durch seitliche Überlaufröhrchen in den Trog zurückfließt, während unten neue Lösung in die Elektrodenräume eintritt. Auf beiden Seiten liegen im Trog Kühlschlangen, welche von kaltem Wasser durchströmt werden und verhüten, daß die Temperatur des Bades über 35° steigt. Abbildung 11 zeigt diesen Elektrolyseur; aus dem vorn sichtbaren Hahn wird die Bleichlauge abgelassen, sobald sie den gewünschten Gehalt an „aktivem Chlor" erreicht hat.

Bei den nach dem Patent Kellner von Siemens & Halske gebauten neueren Bleichelektrolyseuren bestehen die Elektroden aus Platiniridiumdrahtnetz und liegen wagerecht. Durch senkrechte Glasscheidewände ist das niedrige Badgefäß in einzelne Kammern eingeteilt. Die doppelpoligen Elektroden gehen durch eine Kittschicht unten um die Scheidewände herum und sind derartig gebogen, daß sie in der einen Zelle, wo sie als Anode dienen, flach am Boden liegen, in der Nachbarzelle aber als Kathoden durch Glasstäbe in einem gewissen Abstand über der nächsten Elektrode gehalten werden. Abbildung 12 zeigt schematisch diese Anordnung. Die Kontaktverbindungen für die Endelektroden liegen in den mit einer isolierenden Masse ausgegossenen Schlußkammern. Die Lauge fließt langsam über die Elektroden, gelangt dann in ein Kühlgefäß und wird von dort durch eine Pumpe wieder emporgehoben.

Zur Herstellung der Badflüssigkeit dient am besten Steinsalz; um zu verhindern, daß der an der Kathode entwickelte Wasserstoff einen Teil des Hypochlorits durch Reduktion vernichtet, gebraucht man den Kunstgriff, dem Bad etwas Kalk und Türkischrotöl zuzusetzen, wodurch eine die Reduktion hindernde Haut auf der Kathode gebildet wird. Indessen gelingt es wegen verschiedener unvermeidlicher Nebenvorgänge nicht, Bleichlaugen von großer Stärke mit guter Stromausbeute zu gewinnen. Je länger man elektrolysiert, um so stärker wird zwar die Bleichlauge, aber auch um so schlechter die Stromausbeute. Man begnügt sich zweckmäßig mit einem Gehalt von 15 bis höchstens 30 g wirksamem Chlor im Liter und braucht dann für 1 kg aktives Chlor etwa 6 Kilowattstunden. Rechnet man die Kilowattstunde zu 45 Pf., 1 kg Steinsalz zu 2 Pf. und die allgemeinen Unkosten zu 5 Pf., dann kostet 1 kg aktives Chlor etwa 45 Pf., während die entsprechende Menge Chlorkalk um die Hälfte teurer ist. Da die Elektrolytbleiche auch einige andere Vorzüge vor dem Chlorkalk besitzt, so haben schon zahlreiche Wäschereien, Webereien und Zellstoffabriken Bleichelektrolyseure angeschafft. Im



Abbildung 11. Bleichelektrolyseur, Patent Haas & Dr. Oettel.

ganzen sollen jetzt etwa 6000 P.S. für diesen Zweck arbeiten und täglich rund 5000 kg bleichendes Chlor erzeugen, eine Leistung, welche 20000 kg Chlorkalk ersetzt. 2/3 dieser elektrolytischen Bleichlaugen wird von den Papier- und Zellulosefabriken verbraucht.

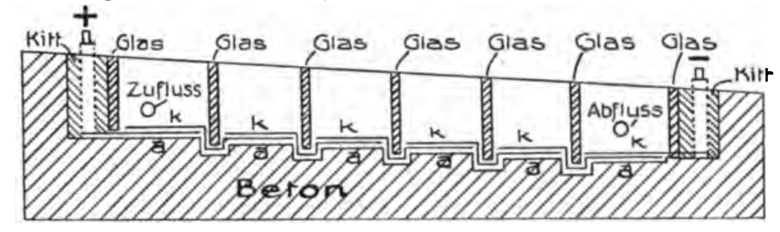


Abbildung 12. Bleichelektrolyseur von Siemens & Halske.

HERSTELLUNG VON CHLORSAUREM KALI. Während man zur Gewinnung von Bleichlaugen durch Kühlvorrichtungen die Badtemperatur niedrig hält und die Elektrolyse nach einer gewissen Zeit abbricht, gelangt man bei genügend langer Elektrolyse einer heißen, schwach sauren Chloridlösung zu chlorsaurem Salz. Man benutzt hier meist eine Kaliumchloridlösung, da aus ihr das entstandene chlorsaure Kali beim Abkühlen gut auskristallisiert, während das Natriumchlorat auch in der Kälte ziemlich leicht löslich ist, sich also nicht so leicht abscheiden läßt. Als Anodenmaterial dient Platiniridium; die Kathoden bestehen meist aus Kohle oder Eisen. Der Elektrolyt, 25prozentige Chlorkaliumlösung, läuft in der Richtung von der Kathode zur Anode durch die Zellen; ein Zusatz von Kalk oder doppelchromsaurem Kali wirkt günstig, indem er ebenso wie bei der Bleichlaugengewinnung die Reduktion des an der Anode entstandenen Oxydationsprodukts durch den an der Kathode auftretenden Wasserstoff hindert. Die Stromausbeute soll über 80% betragen. Sobald die Lösung mit chlorsaurem Kali gesättigt ist, wird sie in Kristallisierpfannen abgelassen, in denen beim Erkalten der größte Teil des chlorsauren Kalis auskristallisiert. Die zurückbleibende Mutterlauge kehrt nach Ersatz des verbrauchten Chlorkaliums in die Elektrolysiergefäße zurück. Die Herstellung von 1 kg chlorsaurem Kali erfordert etwa 7 Kilowattstunden und soll rund 40 Pf. kosten.

Die elektrolytische Chloratgewinnung bietet bei billiger Kraft so große Vorteile vor dem alten chemischen Verfahren, welches Chlorgas in heiße Chlorkaliumlösung einleitete, daß zurzeit etwa 15000 P.S. dieser Fabrikation dienen. Am Niagarafall, an dem sich zahlreiche elektrochemische Werke angesiedelt haben, liegt auch eine Chloratfabrik; in Europa sind Chedde, Vallorbes und St. Michel in den Alpen, Mansboe und Alby in Schweden zu nennen. Die Jahresproduktion an elektrolytisch hergestelltem Kalium-, Natrium- und Bariumchlorat beträgt schätzungsweise etwa 12000000 kg.

Die Chlorate, welche ihren großen Gehalt an Sauerstoff leicht abgeben, werden zur Zündholzfabrikation, in der Feuerwerkerei, in den Farbenfabriken und Zeugdruckereien verwendet.

ELEKTROLYTISCHE GEWINNUNG VON ÄTZKALI UND ÄTZNATRON. Verhindert man bei der Elektrolyse einer Chlorkaliumlösung, daß sich das an der Anode entwickelte Chlor mit dem an der Kathode entstandenen Kaliumhydroxyd umsetzt, so gewinnt man im Kathodenraum Kalilauge und entsprechend bei der Elektrolyse einer Kochsalzlösung Natronlauge, aus denen man durch Eindampfen festes Ätzkali und Ätznatron bekommen kann. Diese Erzeugnisse sind in zahlreichen Zweigen der Industrie, z. B. in der Seifenfabrikation, sehr gesucht, so daß sich ihre Herstellung in größtem Umfange lohnt, zumal wenn man das anodische Chlor gleichzeitig verwertet.

Um die erwähnte Trennung zwischen Anoden- und Kathodenraum durchzuführen, sind dreierlei Anordnungen technisch durchgebildet worden und haben sich alle drei im Großbetriebe bewährt: das Diaphragmen-, das Glocken- und das Quecksilberverfahren. Als Anodenmaterial dient Kohle, neuerdings auch Eisenoxyduloxyd, als Kathodenmaterial bei den ersten beiden Verfahren Eisen, beim dritten Quecksilber.

Beim Diaphragmenverfahren trennt man die Elektroden durch eine poröse Scheidewand, welche wohl den elektrischen Strom hindurchläßt, aber das Vermischen von Kathoden- und Anodenflüssigkeit hindert. Es hat viel Mühe und Zeit gekostet, bis man einen mechanisch und chemisch genügend haltbaren Stoff für diese Scheidewand beschaffte, die außerdem noch einen möglichst kleinen elektrischen Widerstand besitzen muß. Diesen Ansprüchen genügen die Zementdiaphragmen, welche nach dem Verfahren von Matthes & Weber in der Weise hergestellt werden können, daß man Portlandzement mit Kochsalzlösung anrührt. Beim Erhärten des Zements kristallisiert das Kochsalz aus, läßt sich durch Wasser auslaugen und hinterläßt lauter feine Poren.

Diese Diaphragmen werden von der chemischen Fabrik Griesheim-Elektron benutzt, deren Direktor J. Stroof sich seinerzeit um die Ausbildung des Diaphragmenverfahrens große Verdienste erworben hat. Als Elektrolysiergefäße dienen eiserne Kasten, die durch Scheidewände aus Eisenblech in eine Reihe von Räumen geteilt sind, in denen die schmalen Anodenzellen aus porösem Zement stehen. Alle Anoden sind parallel geschaltet; als Kathode dient der Kasten mit seinen Querwänden. Zur Verminderung der Badspannung wird von außen durch einen Dampfmantel auf 85 bis 90° erhitzt. Sobald die Lauge im Kathodenraum einen Gehalt von höchstens 8% freiem Alkali erreicht hat, läßt man sie durch einen Hahn am Boden ab und ersetzt sie durch frische Salzlösung, weil bei weiterer Anreicherung die Stromausbeute zu ungünstig würde. Durch Eindampfen stellt man 50prozentige Handelslauge her; hierbei scheidet sich fast alles beigemengte Chlorkalium ab, das durch Abnutschen von der Lauge getrennt und in die Bäder zurückgegeben wird. Das als Nebenprodukt erhaltene Chlorgas wird aus den gasdicht verschlossenen Anodenzellen fortgeleitet und so gut als möglich verwertet. Zum Teil wird es durch Zusammenpressen verflüssigt und in Stahlflaschen oder in Kesselwagen von mehreren Tausend Kilo Inhalt versandt; zum größeren Teil verarbeitet man es gleich am Erzeugungsort zu Chlorkalk, indem man es auf gelöschten Kalk leitet, oder zu Tetrachlorkohlenstoff und anderen Lösungsmitteln für Fette und Harze. Auch bei der Herstellung des künstlichen Indigo spielt das elektrolytische Chlor eine bedeutsame Rolle. Neuerdings hat man gefunden, daß es sich lohnt, die aus dem Kathodenraum entnommene Alkalilauge durch das aus dem Anodenraum aufgefangene Chlor in Hypochloritlösung umzuwandeln, weil man dann höher konzentrierte Bleichlaugen mit kleinerem Stromaufwand erhält, als wenn man sie direkt durch Elektrolyse herstellt.

Außer dem alten Griesheimer Werk betreibt die A.-G. Griesheim-Elektron nach dem beschriebenen Verfahren noch Anlagen zur Alkalichloridelektrolyse in Bitterfeld, in La Motte bei Compienne (Frankreich) und bei Barcelona (Spanien), wo die Wasserkraft des Ebro ausgebeutet wird.

Das Griesheimer Verfahren ist auch von anderen Gesellschaften, wie der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft, angenommen worden, so daß im ganzen 11 Fabriken mit 33000 P.S. auf diesem Wege jährlich 70000000 kg Ätzkali und Ätznatron erzeugen.

Während das Griesheimer Diaphragmenverfahren diskontinuirlich arbeitet, indem man von Zeit zu Zeit Salz einträgt und Lauge abzieht, wird bei anderen Verfahren

dieser Art fortdauernd Salzlösung in den Anodenraum eingeführt und fertige Lauge aus dem Kathodenraum abgezogen. Diesen und den weiteren Vorteil, sehr starke Lauge zu liefern, bietet das Verfahren der Amerikaner Hargreaves und Bird, welche den Anodenraum mit Asbestdiaphragmen abschließen, an deren Außenseite Kupferdrahtnetze als Kathoden anliegen. Am Boden des Anodenraums tritt Kochsalzlösung ein und fließt oben durch einen Überlauf langsam ab; in den Kathodenraum gelangt ein Teil dieser Lösung, indem er durch das Diaphragma sickert; bei der geringen Flüssigkeitsmenge erzeugt der starke Strom eine stark konzentrierte Natronlauge, die sofort in Soda umgewandelt wird, indem man Kohlensäure und Wasserdampf in den Kathodenraum einbläst. Die Überführung in die minder wertvolle Soda bedeutet freilich einen wirtschaftlichen Nachteil. Eine große Anlage nach Hargreaves-Bird mit über 1000 P. S. arbeitet in der Duncan-Papiermühle zu Mechanicville (N. Y.), welche das Chlor zum Bleichen der Zellulose braucht.

Eine Vervollkommnung bedeutet gegenüber dem Hargreaves-Bird-Verfahren die Townsend-Zelle, bei welcher der Kathodenraum mit Petroleum beschickt ist. Die Salzlösung wird durch ihren eigenen Überdruck durch die Poren des Asbestdiaphragmas gepreßt, gelangt an die Kathoden aus durchlöchertem Eisenblech, welche dem Diaphragma anliegen, und sinkt in dem spezifisch leichteren Petroleum unter. Vom Boden des Kathodenraums fließt die Lauge durch einen Heber ab. Indem man den Zufluß der Salzlösung zum Anodenraum und den Druckunterschied zwischen Anoden- und Kathodenraum zweckmäßig einstellt, kann man die Konzentration der abfließenden Lauge nach Wunsch regeln. In der Anlage der Hooker Electrochemical Co. am Niagarafall arbeiten 52 Townsend-Zellen für 5000 Ampere und 21 Zellen für 4000 Ampere Stromverbrauch. Die abfließende Kathodenlauge enthält 15% Natriumhydroxyd, die Stromdichte beträgt 1500 Ampere auf das Quadratmeter, die Stromausbeute über 90%.

Die neueste und anscheinend sehr zweckmäßige Ausbildung des Diaphragmenverfahrens stellt die Zelle von Billiter dar. Sie besteht aus einer flachen Wanne von armiertem Beton mit schmiedeeisernem Boden. Dicht über dem Boden ruht wagerecht die aus starkem Eisendrahtnetz gefertigte Kathode; auf ihr liegt das aus imprägniertem Asbest bestehende Diaphragma, welches den ganzen Querschnitt ausfüllt. Der obere, als Anodenraum dienende Teil der Wanne enthält eine wagerechte Kohlenplatte als Anode und ist mit einem Betondeckel gasdicht abgedeckt. Oben wird die Salzlösung zugeführt und durch Abzweigrohre gleichmäßig über das Bad verteilt. Durch das Diaphragma gelangt der Elektrolyt in den Kathodenraum, reichert sich dort auf 12,5% Ätznatron an und fließt unten durch einen Syphon ab. Durch Steinzeugrohre, welche die Seitenwand durchsetzen, werden das Chlor aus dem Anodenraum und der Wasserstoff aus dem Kathodenraum abgeleitet. Die Stromausbeute beträgt etwa 90%, die Badspannung weniger als 4 Volt. Nach diesem System ist vor zwei Jahren eine größere Anlage für die Kaliwerke Aschersleben von Siemens & Halske erbaut worden. Abbildung 13 zeigt eine Zelle aus dieser Anlage. Die einzelnen Bäder arbeiten mit 2000 bis 3000 Ampere und sind hintereinandergeschaltet; bei 2000 Ampere liefert jedes Bad in 24 Stunden über 500 l 12,5prozentige Natronlauge, gleich 64 kg Ätznatron, und 57 kg Chlorgas, bei einem Verbrauch von 176 Kilowattstunden.

Ohne Diaphragma wird bei dem Glockenverfahren die Kathodenlauge durch ihre größere Schwere von der darübergeschichteten Anodenlauge getrennt gehalten. Die Anodenzelle hat die Form einer unten offenen Glocke, welche mit ihrer Öffnung

in das Bad eingesenkt ist; in ihr liegt wagerecht die Anode, eine siebartig gelochte Kohlenplatte, dicht unter der Oberfläche der Flüssigkeit. Die Kathode umgibt die Glocke von außen. Die an der Kathode entstandene Kalilauge sinkt zu Boden, während das Chlor durch die Glocke entweicht, ohne die Flüssigkeit aufzurühren. Trotzdem würden sich allmählich Kathoden- und Anodenflüssigkeit miteinander mischen, wenn nicht fortdauernd durch ein Zuflußrohr so viel frische Salzlösung in die Glocke einträte und entsprechend durch einen Überlauf aus dem Bade so viel Lauge abflösse, daß diese Strömung gerade der umgekehrt von der Kathode zur Anode gerichteten Diffusion das Gleichgewicht hielte.

Bei der praktischen Ausführung dieser Anordnung werden von dem österreichischen Verein für chemische und metallurgische Produktion in **Aussig** (Böhmen) schmale rechteckige Glocken aus Eisenblech benutzt, die mit einer isolierenden Masse ausgekleidet sind; der Eisenmantel der Glocke bildet gleichzeitig die Kathode. Je 25 Glocken sind parallel geschaltet und in einem Bade vereinigt. Die durch einen Überlauf austretende Alkalilauge enthält etwa 10% freies Alkali; die Stromausbeute soll über 80% betragen. Ein Nachteil des Glockenverfahrens ist die ziemlich niedrige Stromdichte, mit der man arbeiten muß, um schädliche Strömungen im Bade zu vermeiden. Die Apparatur ist deshalb umfangreicher und die von ihr beanspruchte Fläche größer als bei dem Diaphragmenverfahren. In Aussig sollen etwa 25000 Glocken aufgestellt sein, die 3000 P.S. verbrauchen. Nach demselben Verfahren arbeitet das Salzbergwerk Neustaßfurt, die Aktiengesellschaft für Anilinfabrikation und eine Fabrik bei Magdeburg.

Das dritte der drei Verfahren zur Alkalichloridelektrolyse, das **Quecksilberverfahren**, benutzt als Kathode **Quecksilber**; dann entwickelt sich kein Wasserstoff, sondern das aus der Salzlösung durch den Strom abgeschiedene Alkalimetall wird von dem Quecksilber aufgenommen. Das entstandene Amalgam wird in einem anderen Raum mit Wasser zersetzt, wobei sich unter Wasserstoffentwicklung Kalilauge bzw. Natronlauge bildet. Das zurückbleibende Quecksilber dient dazu, um von neuem Natrium aufzunehmen. Ein besonderer Vorzug dieses Verfahrens ist der, daß es chloridfreie Lauge liefert, die für einige Zwecke der Industrie verlangt wird, ein Nachteil der Gebrauch des teuren Quecksilbers. Auf die sinnreichen Einzelheiten der verschiedenen nach dem Quecksilberverfahren arbeitenden Systeme **Solvay** und **Castner-Kellner** kann ich des beschränkten Raumes halber nicht weiter eingehen. Im ganzen sollen 11 Fabriken nach dem Quecksilberverfahren arbeiten, darunter die große Anlage der **Castner-Kellner-Co.** am Niagarafall mit 6000 P.S.



Abbildung 13. Billiterzelle von Siemens & Halske, zur Gewinnung von Ätzkali und Chlor.

Insgesamt werden in Deutschland jährlich etwa 30000 t Ätzkali, 10000 t Ätznatron und 60000 t Chlorkalk elektrolytisch gewonnen.

6. ELEKTROTHERMIE

Im vorhergehenden hatten wir uns mit solchen technischen Anwendungen der Elektrochemie beschäftigt, bei denen die mächtige chemische Umsetzungskraft der Elektrolyse ausgenutzt wurde. Wir wollen uns nun einigen chemischen Prozessen zuwenden, bei denen der elektrische Strom lediglich als Wärmequelle dient, um die zur Umsetzung nötige hohe Temperatur hervorzubringen. Man bezeichnet dieses Gebiet der Elektrochemie als Elektrothermie; es umfaßt die Fabrikation von Karbid, Ferrosilizium, Karborundum, Alundum, künstlichem Graphit, Phosphor, Schwefelkohlenstoff und Elektrostahl.

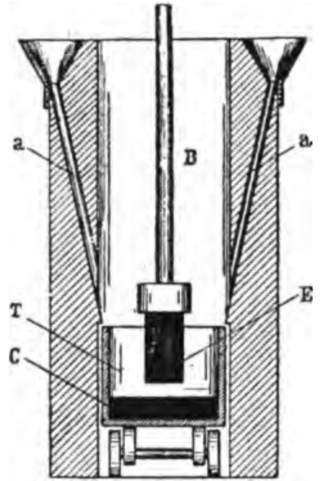
Da bei der Elektrothermie nur die Wärmewirkung des Stroms eine Rolle spielt, so kann man ohne weiteres Wechselstrom statt Gleichstrom verwenden; ja, man gibt gewöhnlich jenem den Vorzug, weil er sich bequem von der zur Fortleitung geeigneteren hohen Spannung an der Verbrauchsstelle in den zur Ofenheizung erforderlichen niedriger gespannten Strom von großer Amperezahl umwandeln läßt. Allerdings muß man bei der Verwendung von Wechselstrom die ganze Apparatur so einrichten, daß nicht durch Selbstinduktion große Energieverluste eintreten.

KALZIUMKARBID. Erhitzt man ein Gemisch von Kalk und Kohle bis etwa auf den Schmelzpunkt des Platins, so verbindet sich je ein Atom Kalzium mit zwei Atomen Kohlenstoff zu Kalziumkarbid, während Kohlenoxydgas entweicht. Die zur Reaktion nötige hohe Temperatur könnte man auch mit dem Knallgasgebläse erreichen; viel bequemer und billiger ist es aber, das Gemisch mit dem elektrischen Lichtbogen zu erhitzen. Auf diese Weise gewann 1894 Moissan zuerst Kalziumkarbid und in der Folge auch andere Karbide. Bald wurde das neue Produkt des „elektrischen Ofens“ fabrikmäßig hergestellt.

Wie einfach auch an und für sich die Karbidfabrikation ist, es sind doch verschiedene Bedingungen zu erfüllen, um ein brauchbares Produkt mit guter Ausbeute zu erhalten. Da die Verunreinigungen der Rohstoffe in das Karbid übergehen und seinen Wert vermindern — besonders Phosphor ist sehr schädlich —, so muß man möglichst reinen Kalk und möglichst reine Kohle verwenden. Der Kalk soll nicht mehr als 0,006% Phosphor und möglichst wenig Schwefel, Magnesia, Tonerde und Kieselsäure enthalten. Auch die Kohle soll möglichst frei von Phosphor, Arsen und Schwefel sein und nur wenig Asche geben. In bezug auf Reinheit verdient Holzkohle den Vorzug, die aber nur unter besonderen Verhältnissen billig genug zu beschaffen ist, nächst ihr Anthrazit und an dritter Stelle Koks. Diese Materialien werden bis auf Faust- oder Nußgröße zerkleinert und im Verhältnis etwa von 1000 kg Kalk zu 700 kg Kohle gemischt.

Die Karbidöfen sind zumal in der Entwicklungsperiode dieser Industrie in den mannigfachsten Formen konstruiert worden. Je nach der Stromzuführung unterscheidet man Öfen, bei denen der Boden des Tiegels die eine Elektrode bildet, und solche Öfen, bei denen beide (oder bei Drehstrom drei) Elektroden von oben her eingeführt sind. Zweitens unterscheidet man nach der Form, in welcher das Karbid dem Ofen entnommen wird, Öfen mit Blockbetrieb und solche mit Abstich. Da das Kalziumkarbid erst gegen 2000° dünnflüssig ist und beim Abkühlen rasch erstarrt, so gelang es bei den kleinen älteren Karbidöfen nicht, es nach Wunsch abzustechen und dadurch den Prozeß zu einem Dauerbetrieb zu gestalten. Man beschränkte sich

deshalb darauf, eine größere Menge von Karbid im Tiegel anzusammeln, dann den Ofen auszuschalten und den gewonnenen Block von 300 bis 400 kg herauszuholen. Abbildung 14 zeigt das Schema eines solchen Blockofens. Sein Schmelzherd besteht aus einem eisernen, mit Kohle ausgekleideten, auf Rädern fahrbaren Wagen T, der mit dem einen Pol der Stromzuleitung verbunden ist. Die andere Elektrode E, ein Kohlenprisma von großem Querschnitt, hängt an einem Flaschenzug in den Ofen hinab; ihr wird der Strom durch biegsame Kabel zugeführt. Zu Beginn senkt man die obere Elektrode, bis sie die Kohlenplatte C berührt, hebt sie ein wenig, so daß sich ein Lichtbogen bildet, und führt nun durch die Kanäle a a eine gewisse Menge der Mischung von Kalk und Kohle ein. In der Hitze des Lichtbogens entsteht geschmolzenes Karbid, das die Herdsohle als gut leitende Schicht bedeckt. Im Maße, wie die Karbidbildung fortschreitet, wird frische Mischung zugeschüttet und die obere Elektrode gehoben, bis der Tiegel gefüllt ist. Dann fährt man den Wagen zur Seite und schlägt, sobald sich das Karbid genügend abgekühlt hat, den Karbidblock heraus. Von dem Block muß dann noch die mit Kalk und Kohle durchsetzte minderwertige äußere Schicht mit dem Meißel entfernt werden, eine mühselige und wegen der schädlichen Staubentwicklung unangenehme Arbeit.



Abbild. 14. Block-Karbidofen.

Ein Nachteil dieser Öfen mit unterer Zuleitung des Stromes sind die häufigen Reparaturen, da der Kohlenboden des Tiegels allmählich aufgezehrt wird und die Stelle, an welcher das Stromkabel angeklemmt ist, durch Hitze und Staub rasch verschleißt. Besser sind in dieser Beziehung solche Blocköfen, bei denen der Strom nur von oben eingeführt wird; in diesen sogenannten Serienöfen geht der Strom von der einen Elektrode zum Tiegelinhalt und von diesem wieder aufwärts zur anderen Elektrode. In Serienöfen für 500 P. S. lassen sich Blöcke bis zu 1000 kg Gewicht herstellen. Die allgemeinen Nachteile der Blocköfen: große Wärmeverluste durch den unterbrochenen Betrieb, die bedeutenden Materialverluste und der große Bedarf an Arbeitskräften, haften auch diesen Serienöfen an.

Neuerdings ist man deshalb immer mehr zum Abstichbetrieb übergegangen. Abbildung 15 zeigt einen solchen modernen Abstichofen für 4000 bis 6000 Kilowatt, der mit Dreiphasenstrom (Drehstrom) betrieben wird. Von oben her ragen die drei Elektroden, im Dreieck angeordnet, in den breiten Ofenherd hinein. Der Herd ist mit Kohle ausgekleidet, die eiserne Bodenplatte mit Kühlrippen versehen. Der Durchmesser des Herdes ist so bemessen, daß sich seine Innenwand beim Betrieb mit einer festen Kruste bekleidet; auf diese Weise schützt man die Wandungen am besten vor übermäßiger Erhitzung

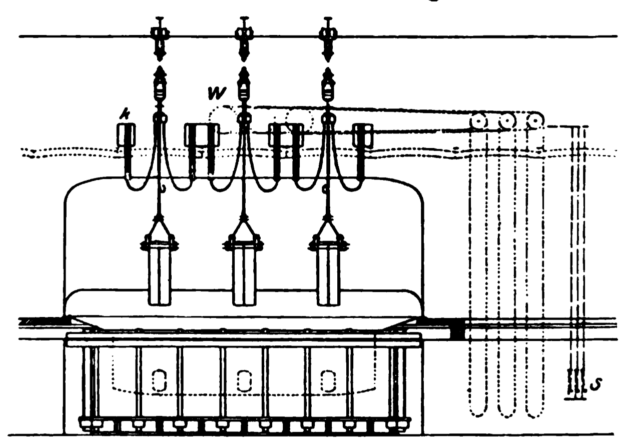


Abbildung 15. Abstichofen für Dreiphasenstrom.

und rascher Abnutzung. Da das geschmolzene Karbid zu rasch erstarrt, als daß es etwa wie geschmolzenes Eisen aus einem gewöhnlichen Abstichloch ohne weiteres ausflösse, ist man in den letzten Jahren nach langen Schwierigkeiten dazu gekommen, mit einer Hilfselektrode die nötige Abstichöffnung bei jedem Abstich frisch durchzubrennen. Sobald sich eine genügende Menge Karbid im Ofen angesammelt hat, wird die aus Ziegeln zusammengesetzte Ofenwand aufgebrochen und mit einer zugespitzten Kohlenelektrode, die sich an einer langen Stange befindet, in die feste Kruste, welche das flüssige Karbid umgibt, ein geräumiges Loch gebrannt, aus welchem die Schmelze bequem ausfließt. Durch genaue Bemessung von Strom und Beschickung

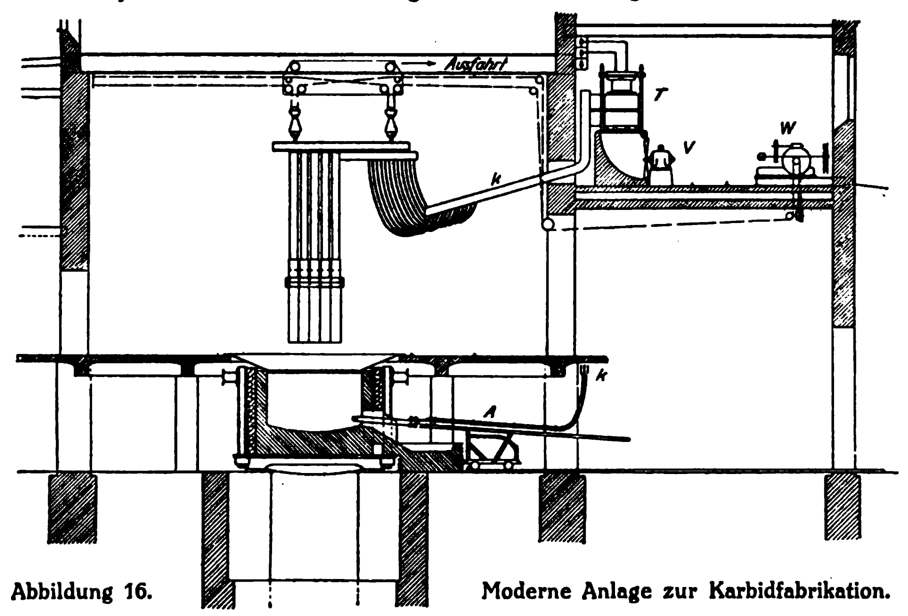


Abbildung 16. Moderne Anlage zur Karbidfabrikation.

erreicht man, daß nach bestimmter Zeit reines Karbid von bestimmter Temperatur abgezapft werden kann.

Abbildung 16 zeigt die gesamte Anlage des Ofens nebst Zubehör. A ist die fahrbare Abstichelektrode, der durch das Kabel k ein so starker Zweigstrom zugeführt wird, daß eine Karbidwand von 1/2 m Dicke in 20 Minuten durchgeschmolzen wird. T sind die Transformatoren, V die Ventilatoren, W die Hubwerke für die Elektroden und S (Abbildung 15) Stellwerke, mit deren Hilfe man je nach Wunsch Hand- oder Motorbetrieb für jede Winde einschaltet.

Noch größere Öfen, bis zu 12000 P.S., werden als doppelte Dreiphasenöfen mit 6 Elektroden gebaut; ein solcher Riesenofen ist in Hafslund (Norwegen) seit 1907 im Betrieb.

Eins der größten Karbidwerke der Welt befindet sich in Odda (Norwegen); dort arbeiten zwölf Öfen, jeder mit 1400 Kilowatt; die Spannung beträgt 50 Volt, die Stromstärke 28000 Ampere. Alle 3/4 Stunden wird das Karbid abgestochen, in schweren Gußeisentrögen aufgefangen und in das benachbarte Kühlhaus gefahren. Die rotglühenden, 15 cm dicken und 1 qm großen Karbidplatten werden dort durch kalte Luft so weit abgekühlt, daß man sie zerschlagen und in Maschinen zerkleinern kann. Das zerkleinerte Karbid wird durch Siebe in die verschiedenen Handelssorten von verschiedener Korngröße gesondert und dann in Blechbüchsen gepackt.

Das Kalziumkarbid dient in erster Linie zur Erzeugung von Azetylen. In besonders eingerichteten Gasentwicklern wird es mit Wasser zusammengebracht, wobei sich der Kohlenwasserstoff Azetylen entwickelt und gelöschter Kalk zurückbleibt. Das Azetylen gibt beim Verbrennen ein sehr helles Licht; mit Luft gemischt liefert es eine sehr heiße Flamme, die zur Gasglühlichtbeleuchtung benutzt wird. In Deutschland gibt es nach Angabe von Vogel etwa 150 Azetylenzentralen zur Beleuchtung von Ortschaften und über 30000 kleine Anlagen zur Beleuchtung einzelner Häuser und Gehöfte. Besonders gut eignet sich das Azetylen für tragbare Lampen, z. B. Fahrradlampen und Grubenlampen. Beim Verbrennen mit reinem Sauerstoff gibt das Azetylen eine Flamme, die noch heißer ist als die des Knallgasgebläses und seit einigen Jahren zum Verschweißen und zum Zerschneiden von Eisenteilen dient. Im Gegensatz zu Wasserstoff und Sauerstoff darf man das Azetylen nicht ohne weiteres komprimieren und in Stahlflaschen versenden, weil verdichtetes Azetylen explosiv ist (es zerfällt leicht in seine Bestandteile Wasserstoff und Kohle), sondern man preßt es in Azeton, eine Flüssigkeit, die bei 15 Atmosphären Druck etwa das 150fache seines eigenen Volumens an Azetylen zu lösen vermag.

Seit einigen Jahren wird von verschiedenen Werken ein Teil des fabrizierten Karbids gleich am Erzeugungsort fein gemahlen und zu Kalkstickstoff verarbeitet, indem man über das glühende Karbidpulver Stickstoff leitet. Auf diese Weise verwertet z. B. das große Karbidwerk Odda einen großen Teil seiner Produktion.

Von allen Zweigen der elektrochemischen Industrie hat sich die Karbidfabrikation am raschesten zu Riesengröße entwickelt, und zwar über den wirklichen Bedarf hinaus, so daß schwere Krisen die junge Industrie erschütterten und erst durchgreifende Verbesserungen in der Fabrikation es den gutfundierten Werken möglich machten, auch bei den gesunkenen Karbidpreisen (1908 fiel der Preis für die Tonne Karbid bis auf 170 Mark) noch mit Gewinn zu arbeiten.

Heutzutage braucht man für die Tonne Karbid nur noch 1500 bis 1600 kg an Rohmaterialien gegen 2000 kg im Jahre 1900; der Verbrauch an Elektroden ist von 100 kg auf 20 kg, die Arbeitskosten sind von 30 bis 40 auf 15 bis 20 Mark gesunken. Die Ausbeute beträgt für die Tagespferdekraft (24 P.-S.-Stunden) 4½ kg statt früher 3 bis 3½ kg. Die Selbstkosten sind bei vollem Betrieb in einer günstig gelegenen Fabrik auf etwa 100 Mark zu schätzen.

Die Weltproduktion an Kalziumkarbid ist auf jährlich 250000 t zu veranschlagen, während der Verbrauch kaum 200000 t beträgt. In Deutschland werden nur 10000 t Karbid erzeugt, aber 40000 t verbraucht. Die größten Produzenten sind Schweden-Norwegen (65000 t), die Vereinigten Staaten und Kanada (40000 t), Italien, Österreich-Ungarn, Frankreich und die Schweiz (je 30000 t).

FERROSILIZIUM. Erhitzt man Quarz mit Kohle und metallischem Eisen in einem elektrischen Ofen, wie er in der Karbidindustrie benutzt wird, so bildet sich durch Reduktion des Quarzes Silizium, das sich mit dem Eisen zu Ferrosilizium vereinigt, und zwar entsteht je nach dem Mischungsverhältnis der Rohstoffe ein Produkt von geringerem oder höherem Siliziumgehalt, bis zu 95% aufwärts. Da das Ferrosilizium in der Eisenindustrie als Zusatz zum geschmolzenen Eisen vielfach verwendet wird, so haben, zumal in den Zeiten der Karbidkrisen, viele Karbidwerke die Fabrikation von Ferrosilizium (und anderen Ferrolegierungen) aufgenommen.

Das Rohmaterial ist Stückquarz, Drehspäne und sonstige Abfälle von Stahl und Schmiedeeisen (Gußeisen eignet sich wegen seines hohen Phosphorgehalts nicht) und möglichst aschefreie Kohle. Um 1 t 50prozentiges Ferrosilizium herzustellen, braucht

man etwa 1400 kg Quarz, 1000 kg Koks und 650 kg Eisenspäne. Bis zu 50 % aufwärts ist das Ferrosilizium dünnflüssig und sinkt wegen seiner Schwere auf den Boden des Herdes, wo es sich leicht abstechen läßt. Die Verunreinigungen der Rohstoffe bilden zähflüssige Schlacken, welche von Zeit zu Zeit entfernt werden müssen. Man brennt zu diesem Zwecke mit einer Hilfselektrode eine große Öffnung in die Brust des Ofens und holt die grünliche, träg ausfließende Schlacke mit Holzstangen und Eisenhaken heraus, bei großen Öfen oft mehrere tausend Kilogramm in einem Auslauf. Verwendet man Holzkohle, dann entsteht nur wenig Schlacke, die dünnflüssig ist und bei jedem Abstich von Ferrosilizium mitfließt, so daß man das lästige Entschlacken spart, das man bei Verwendung von Anthrazit und Koks gewöhnlich täglich ausführen muß.

Im Gegensatz zum 50prozentigen Ferrosilizium, dem Hauptprodukt des Marktes, ist das 75prozentige wegen seines bedeutend höheren Schmelzpunktes und seines kleineren spezifischen Gewichts nicht so leicht abzustechen. Bei großen Öfen läßt man oft das hochprozentige Ferrosilizium so lange auslaufen, bis die Abstichöffnung sich von selbst wieder verstopft.

Das ausgeflossene Ferrosilizium wird zur rascheren Abkühlung mit Wasser bespritzt und kommt dann in den Kühlraum. Nachdem Schlackenansätze entfernt sind, wird es als Stückware zu je 100 bis 200 kg in Holzfässer oder Kisten verpackt.

Der Kraftaufwand beträgt für die Tonne 50prozentiges Ferrosilizium im Mittel 7000 Kilowattstunden, die gesamten Unkosten bei billiger Wasserkraft schätzungsweise 200 Mark, während der Handelswert etwa 300 Mark beträgt.

Bei der Herstellung von 75prozentigem Ferrosilizium sind die Ausbeuten an Material erheblich schlechter und der Stromverbrauch höher, weil man mit großer Stromdichte arbeiten muß und eine erhebliche Menge von Silizium durch Verdampfen verloren geht. Dementsprechend ist der Preis von 75prozentigem Ferrosilizium sehr viel höher und beträgt für die Tonne etwa 600 Mark. Trotzdem zieht man neuerdings das hochwertige Produkt vor, weil das 50prozentige sich oft von selbst zersetzt, wobei sich giftige Gase, wie Phosphorwasserstoff, entwickeln, wodurch mehrfach Explosionen und Todesfälle verursacht wurden. Man hat deshalb schon vorgeschlagen, den Transport von 40- bis 60prozentigem Ferrosilizium ganz zu verbieten.

Ferrosilizium bis zu 20 % kann man auch ohne Elektrizität im Hochofen herstellen.

Im ganzen werden jährlich etwa 65000 t Ferrosilizium hergestellt. Einige der größten Produzenten sind die Girod-Werke der Société anonyme Electrometallurgique in Ugine (Savoyen), Courtepin und Monbovon (Schweiz), die jetzt jährlich 5000 t 50prozentiges und 1000 t 30prozentiges Ferrosilizium herstellen; sie verfügen über 18000 P. S.

Andere Eisenverbindungen, die im elektrischen Ofen hergestellt werden, sind Ferrochrom, Ferrowolfram, Ferromolybdän und Ferrovanadium. Diese Legierungen werden in der Eisenindustrie dem flüssigen Eisen zugegeben, um Chrom-, Wolfram- usw. Stahl zu erzeugen. Die Girod-Werke fabrizieren jährlich etwa 2000 t Ferromolybdän und 5 bis 10 t Ferrovanad. Der Wert dieser Produktion beträgt etwa 5 Millionen Mark.

KARBORUNDUM. Wenn Quarzsand mit einem Überschuß von Kohle im elektrischen Ofen erhitzt wird, so verbindet sich das entstandene Silizium mit Kohle zu Siliziumkarbid, einer kristallinischen Masse, die sich aber bei zu hohem Erhitzen wieder in ihre Bestandteile zersetzt. Der Amerikaner Acheson, welcher dieses Produkt beim Versuche, künstlichen Korund herzustellen, erhielt und ihm den Namen

Karborundum gab, erkannte sofort den hohen technischen Wert, welchen diese Substanz wegen ihrer außerordentlichen Härte als Schleifmittel besitzt, und gründete die Carborundum Company, die 1895 ihre Fabrik am Niagarafall in Betrieb setzte.

Die elektrischen Öfen zur Karborundumgewinnung sind keine Lichtbogenöfen, sondern erzeugen die nötige Temperatur von 2000° dadurch, daß ein zwischen den Elektroden gelagerter Widerstand aus gekörnter Kohle durch einen genügend starken Strom erhitzt wird. Um diesen Kern herum wird das Gemisch von Quarzsand und Koks gehäuft. Nach beendeter Reaktion wird der Ofen abgebaut und das fertige Karborundum herausgebrochen.

Der ganze Ofen hat die Form eines etwa 5 m langen rechteckigen Troges, an dessen Stirnseiten die den Strom zuführenden Kohlenprismen wagerecht eingebaut sind. Die Ofenwände bestehen aus feuerfester Masse und sind aus größeren Stücken zusammengesetzt, welche durch eiserne Rahmen zu einem Ganzen vereinigt werden. So läßt sich mit Hilfe von Kränen der Ofen rasch zusammenbauen und wieder zerlegen. Bei dem Ofenbau ist ferner Rücksicht darauf genommen, daß die während der Reaktion entweichenden Gase nach allen Seiten frei entweichen können. Der Kern hat etwa 1/2 m Durchmesser; rings um ihn ist das Gemisch aus Quarz und Kohle gehäuft, dem bis zu 10% Sägemehl beigemengt sind, um die Masse porös zu erhalten. Ein Zusatz von 2% Kochsalz ist erfahrungsgemäß günstig für den Prozeß. Abbildung 17 zeigt einen fertig aufgebauten Ofen.

Sobald der Strom angelassen wird, erhitzt sich der Ofen von innen nach außen. Zunächst entweichen brenzlige Dämpfe vom Sägemehl, dann entwickelt sich Kohlenoxyd, das angezündet wird und den ganzen Ofen mit blauen Flammen umgibt. Die Bildung des Siliziumkarbids schreitet vom Kern aus konzentrisch fort, die Beschickung, die anfangs hoch über den oberen Rand des Ofens gehäuft war, sinkt zusammen. Während des Anheizens nimmt der elektrische Widerstand des Ofens ab; man erhöht entsprechend die Stromstärke bei den 2000-P. S.-Öfen der Carborundum Co. allmählich bis auf 20000 Ampere. Nach 36 Stunden ist der Prozeß beendet; dann stellt man den Strom ab, entfernt die Seitenwände des Ofens und die äußere unveränderte Schicht der Beschickung, läßt einige Stunden erkalten und baut dann weiter ab. Es folgt ein Gürtel von amorphem Siliziumkarbid und dann eine 1/3 bis 1/2 m dicke grauschwarze, in den schönsten Anlauffarben schillernde Schicht von kristallinischem Karborundum, die sorgfältig von den Verunreinigungen und dem Kern getrennt wird. Die zusammengebackenen Kristalle werden in Pfannenmühlen zerkleinert und zur Reinigung mit Schwefelsäure behandelt.

Die 2000-P. S.-Öfen der Karborundum-Gesellschaft liefern bei jedem Gange 7000 kg kristallisiertes Karbid. 1 kg Karborundum erfordert 8,5 Kilowattstunden.

Die ganze Anlage dieser Gesellschaft verfügt über 7000 P. S., die in Einheiten von 1000 und 2000 P. S. eingeteilt sind, deren jede mit 5 Öfen von je 1000 oder 2000 P. S. verbunden ist. Von den 5 Öfen jeder Reihe ist immer nur einer im Gang, während die anderen erkalten, abgebaut oder beschickt werden. Die jährliche Produktion der Karborundumfabrik am Niagara beträgt gegen 3000 t im Werte von etwa 1 1/2 Millionen Mark. Eine deutsche Karborundumfabrik befindet sich in Rheinfelden bei Basel.

Zur Verwendung als Schleifmittel wird das Karborundumpulver mit Kaolin und Feldspat als Bindemittel gemischt, unter hohem Druck in Formen gepreßt und im Porzellanofen gebrannt. Die Scheiben aus Karborundum werden in der Industrie vielfach zum Schleifen von Metall, Holz, Stein usw. benutzt. Die große Härte des

Materials erlaubt ein sehr rasches Arbeiten; so schleift man z. B. an Marmorblöcken mit entsprechend geformten Karborundumscheiben schwierige Profile mit einer Geschwindigkeit von 3 m in der Minute. Auch in der Papierfabrikation benutzt man die Härte des Siliziumkarbids, indem man das Ganzzeug in den Zeugpritschen durch Karborundumstücke zerfasern läßt. In Zement eingebettet liefert ferner das Karborundum Platten, die auf vielbegangenen Treppen auch durch den stärksten Verkehr nicht abgeschliffen werden, sondern dauernd rauh bleiben. Wegen seiner Feuerfestigkeit dient schließlich das Karborundum in der Metallurgie als Auskleidung von Tiegeln und Öfen.

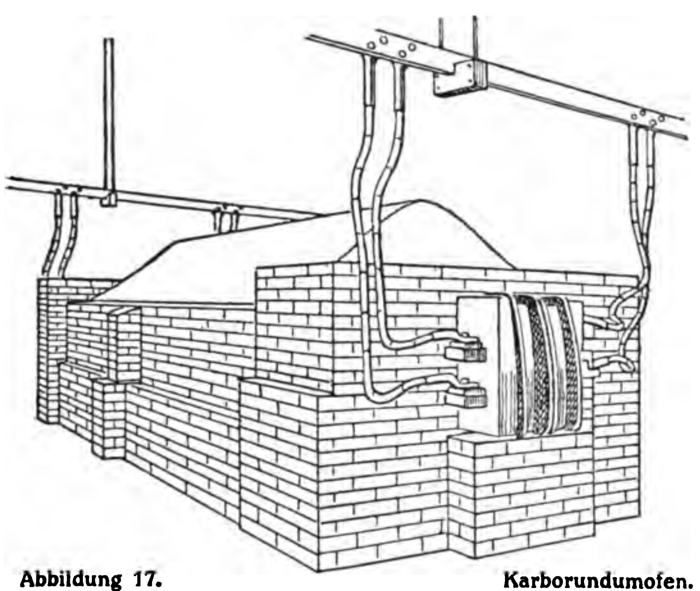


Abbildung 17. Karborundumofen.

ALUNDUM. Ein anderes im elektrischen Ofen gewonnenes Schleifmittel ist geschmolzene Tonerde, die von der Norton-Gesellschaft am Niagarafall unter dem Namen Alundum hergestellt wird. Ihre chemische Zusammensetzung, Aluminiumoxyd, ist der des natürlichen Schmirgels gleich, als dessen Ersatz sie dient.

Rohstoff ist Bauxit (Aluminiumhydroxyd), der in einigen Gegenden der Vereinigten Staaten in großen Lagern von ausgezeichneter Beschaffenheit vorkommt. Er wird in einem Drehrohrofen vorgebrannt und dann in einem elektrischen Ofen, der dem Serienofen zur Herstellung von Blockkarbid ähnelt, eingeschmolzen. Die Elektrodenfassungen und der Mantel des Ofens werden durch fließendes Wasser gekühlt.

Ist der Ofenherd gefüllt, so unterbricht man den Strom, zieht die Elektroden hoch und läßt erkalten. Der erhaltene Block wird abgeputzt und in einem Brecherwerk zerkleinert; der Abfall wird von neuem eingeschmolzen, die übrige Masse auf passende Korngröße gebracht und als Schleifpulver verkauft oder zu Schleifscheiben verarbeitet; seine Härte wird nur vom Diamant übertroffen. Neuerdings werden auch Schmelztiegel und andere feuerfeste Geräte aus Alundum gefertigt, die erst bei 2000° schmelzen. 1907 stellte die Norton-Company etwa 3 Millionen kg Alundum her im Werte von 1,7 Millionen Mark.

In Deutschland wird die geschmolzene Tonerde von den Diamantinwerken in Rheinfelden fabriziert.

ACHESON-GRAPHIT. Erhitzt man Anthrazit oder Koks im elektrischen Ofen auf genügend hohe Temperatur, so wandelt sich die Kohle in Graphit um, der an Güte dem besten natürlichen Graphit gleichkommt und ihm sogar in einigen Beziehungen überlegen ist. Die zur Graphiterzeugung von der Internationalen Acheson-Graphit-Gesellschaft benutzten Öfen sind den Karborundumöfen sehr ähnlich, nur schmäler, entsprechend der besseren elektrischen Leitfähigkeit ihrer Beschickung.

Um losen Graphit in Form von Schuppen oder Pulver zu erhalten, wird pennsylvanischer Anthrazit, der bis auf die Größe von Reiskörnern zerkleinert ist, rings um

den aus gekörntem Koks bestehenden Kern geschichtet und mit einem Karborundumgemisch von Sand und Koks bedeckt. Der 1000-P.S.-Ofen wird mit 210 Volt und 1400 Ampere in Gang gesetzt. Im Laufe der Stunden sinkt der Widerstand im Ofen so weit, daß man über 9000 Ampere bei 80 Volt Spannung hindurchschickt. Nach 12 bis höchstens 24 Stunden wird der Ofen ausgeschaltet und abgebaut. Er liefert bei jedem Gange gegen 6000 kg Graphit, der völlig frei von Schwefel ist und höchstens 10 % Asche enthält.

Durch längeres Erhitzen und durch Verwendung von Petroleumkoks statt Anthrazit erhält man feinere Qualitäten von Graphit. Indessen ist es dann nötig, der Beschickung einige Prozent Eisenoxyd beizumengen, welches die Umwandlung des Kokses in Graphit beschleunigt.

Der gewonnene lockere oder zu Klumpen zusammengebackene Graphit wird fein gemahlen, in einem Windseparator von härteren Teilen und Fremdkörpern befreit und dann in Fässer oder Säcke gehüllt.

Ein sehr reiner Graphit, der weniger als 1 % Verunreinigungen enthält und sich als Schmiermittel eignet, wird unter besonderen Vorsichtsmaßregeln gewonnen und als Nr. 1340 in den Handel gebracht.

Durch Behandlung mit Wasser, Gerbsäure und Ammoniak wird der Acheson-Graphit noch feiner verteilt, so daß er mit Wasser oder Öl Suspensionen bildet, welche als Anstrichfarbe oder Schmiermittel verwandt werden.

Um geformte Kohlegegenstände, vornehmlich Elektroden, in Graphit zu verwandeln, werden aus ihnen Pakete gebildet und unter Zwischenschüttung von Kohlepulver in den Ofen gelegt. Auch hier ist es nötig, der aschearmen Kohle einen Zusatz von Eisenoxyd zu geben. Damit die Gegenstände durch und durch in Graphit umgewandelt werden, muß man genügend hoch und lange erhitzen. Die Temperatur darf aber nur allmählich gesteigert werden und nur bis zu einer gewissen oberen Grenze; sonst werden die Gegenstände rissig. Elektroden aus Acheson-Graphit leiten bedeutend besser als die gewöhnlichen Kohleelektroden, die nur im Gasofen gebrannt sind, und lassen sich wegen ihrer Weichheit leicht bearbeiten, sind aber auch ziemlich teuer.

Die Anlage der Acheson-Gesellschaft am Niagarafall verfügt über 22 Öfen und 4000 P.S.; 1908 wurden über 3000000 kg Graphit im Werte von rund 2 Millionen Mark erzeugt.

Seitdem das Patent von Acheson abgelaufen ist, hat man auch in Deutschland die Fabrikation von künstlichem Graphit aufgenommen.

ELEKTROTHERMISCHE PHOSPHORGEWINNUNG. Phosphor wird aus phosphorsaurem Kalk gewonnen, indem man diesen mit Kieselsäure (Quarzsand) und Kohle gemischt auf Weißglut erhitzt; der freigewordene Phosphor destilliert ab und wird wegen seiner Entzündlichkeit unter Wasser aufgefangen. Die gasdichten Gefäße (Retorten) aus feuerfestem Ton, in denen man das Gemisch glüht, leiden bei der hohen Temperatur sehr und müssen oft erneuert werden. Hier bietet die elektrische Erhitzung der Reaktionsmasse große Vorteile.

Abbildung 18 zeigt den von Readman zur Phosphorgewinnung konstruierten elektrischen Ofen, dessen Körper F aus feuerfesten Steinen aufgebaut ist. In den Ofenherd A ragen seitlich Kohleelektroden E und e hinein. Durch eine Öffnung in der gewölbten Decke wird die Beschickung mit Hilfe eines Trichters H und einer Schnecke S zugeführt. Angeheizt wird mit den dünneren Hilfselektroden e e; sobald die Temperatur hoch genug ist, wird durch die großen Elektroden E E starker

Strom eingeleitet. Phosphor und Kohlenoxyd entweichen durch die Öffnung D in einen Abzugskanal; der entstandene kieselsaure Kalk sammelt sich als Schmelze am Boden und wird nach Bedarf abgestochen. Der Ofen verbraucht 50 P. S. und liefert täglich 80 kg Phosphor.

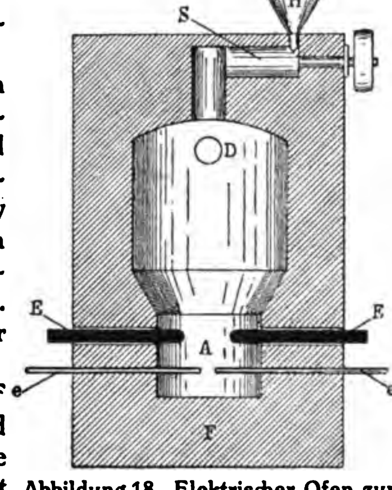


Abbildung 18. Elektrischer Ofen zur Phosphorgewinnung.

Gegenwärtig wird schon die Hauptmenge des in den Handel gebrachten Phosphors im elektrischen Ofen gewonnen. Die größte Anlage liegt in Wednesfield (Oldbury) in England, wo jährlich 500000 kg Phosphor fabriziert werden; eine Tochterfabrik der Oldbury Electrochemical Co. arbeitet mit 6 Phosphoröfen von 50 P.S. am Niagarafall. Andere große Fabriken befinden sich in Lyon, in Griesheim bei Frankfurt a. M. und in Schweden. Der Hauptabnehmer für Phosphor ist die Zündholzindustrie.

GEWINNUNG VON SCHWEFELKOHLENSTOFF IM ELEKTRISCHEN OFEN. Schwefelkohlenstoff wird gewonnen, indem man Schwefeldampf über glühende Kohlen leitet; dann verbindet sich der Schwefel mit der Kohle zu einer leichtflüchtigen Flüssigkeit, welche zum Lösen von Fetten und von Kautschuk in der Industrie vielfach verwandt wird.

Will man große Mengen Schwefelkohlenstoff fabrizieren, so braucht man dazu zahlreiche Retorten, deren Überwachung und häufige Erneuerung recht lästig ist. Diese Schwierigkeiten vermeidet Taylor in dem von ihm erfundenen elektrischen Ofen (Abbildung 19). Wie im Phosphorofen sind Kohleelektroden in den Ofenherd seitlich eingeführt. Um die Elektroden zu schonen, werden sie von den Fülltrichtern MM aus mit Kohleklein bedeckt.

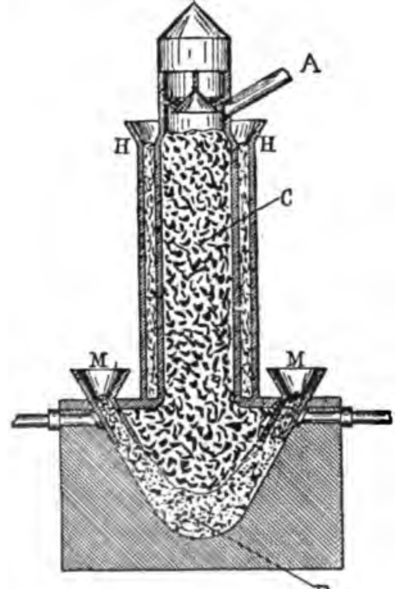


Abbildung 19. Elektrischer Ofen von Taylor zur Schwefelkohlenstoffgewinnung.

Die beiden Bestandteile der Beschickung werden getrennt eingeführt, die Kohle durch ein gasdichtes Ventil in der Ofendecke, der Schwefel durch einen Hohlraum HH, der den Ofenmantel ringförmig umgibt. Durch die Ofenhitze wird der Schwefel geschmolzen, fließt herab auf die Herdsohle F, verwandelt sich in Dampf und steigt in den mit Kohle angefüllten Ofenschacht C hinauf. Der entstandene Schwefelkohlenstoff destilliert durch das Ansatzrohr A oben ab und wird durch Kühler verdichtet.

Der Ofen arbeitet in Penn Yan (Neuyork); er ist 12 m hoch und hat 5 m Durchmesser, verbraucht 4000 Ampere bei 40 bis 60 Volt und liefert in 24 Stunden 5000 kg Schwefelkohlenstoff. Der Betrieb regelt sich selbst; steigt die Ofentemperatur zu hoch, so fließt der geschmolzene Schwefel reichlicher ein und steigt bis an die Elektroden; dadurch wächst der Widerstand im Ofen, weil der Schwefel den Strom nicht leitet; die Stromstärke sinkt und damit auch die Hitze, bis wieder normale Verhältnisse eingetreten sind.

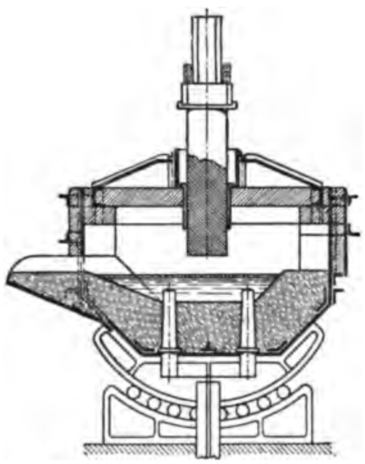


Abbildung 20. Lichtbogenofen von Girod.

ELEKTROSTAHL. Seit einigen Jahren hat der elektrische Ofen auch in der Eisenindustrie seinen Einzug gehalten, und zwar wird er zur Raffination von Stahl mit Vorteil benutzt. Seine Vorzüge sind die höhere Temperatur, welche mit hochbasischen Schlacken zu arbeiten und den Stahl von Verunreinigungen besser zu befreien gestattet, so daß man aus gewöhnlichem Eisen einen sehr reinen, hochwertigen Stahl erhält; ferner die leichte Regelung der Wärmezufuhr und nicht zum wenigsten der Luftabschluß des Ofens.

Bahnbrechend war auf diesem Gebiete ein Italiener, Stassano. Sein Ofen besteht aus einem zylindrischen Schmelzraum, der von einem halbkugeligen Gewölbe bedeckt ist. Durch die Seitenwand treten die Elektroden ein; das Schmelzgut wird durch die strahlende Glut des Lichtbogens geschmolzen. Der ganze Ofen ist auf einer gegen das Lot schwach geneigten Achse drehbar gelagert; durch die Umlaufbewegung wird die Hitze gleichmäßig verteilt und die Schmelze gut durchgemischt. Nachteile des Ofens sind die komplizierte Konstruktion und die häufigen Ausbesserungen des Ofenfutters.

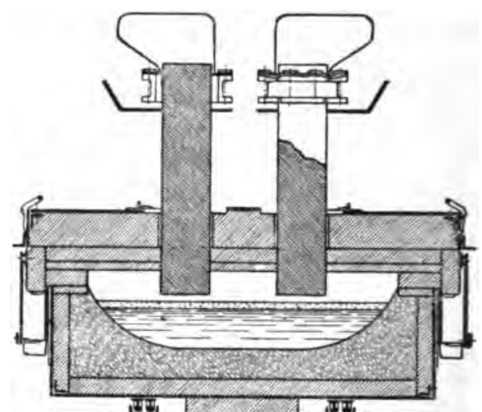


Abbildung 21. Lichtbogenofen von Héroult.

Günstiger sind in dieser Beziehung die Öfen, bei denen das Schmelzgut durch den Lichtbogen selbst erhitzt wird. Von diesen besitzt der Ofen von Girod (Abbildung 20) die eine Stromzuführung am Boden, durch dessen Futter wassergekühlte Stahlelektroden eintreten. Die andere Elektrode besteht aus einem (oder mehreren) Kohlenprisma, das durch die Decke herabhängt; der Lichtbogen geht von der oberen Elektrode zu der das Eisen bedeckenden Schlackenschicht. Zum Entleeren wird der auf Rollen gelagerte Ofen gekippt.

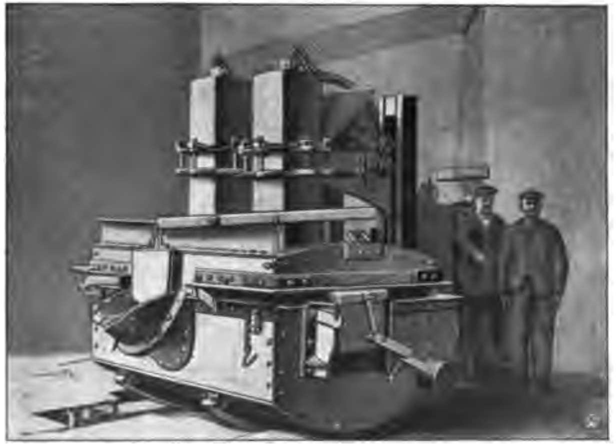
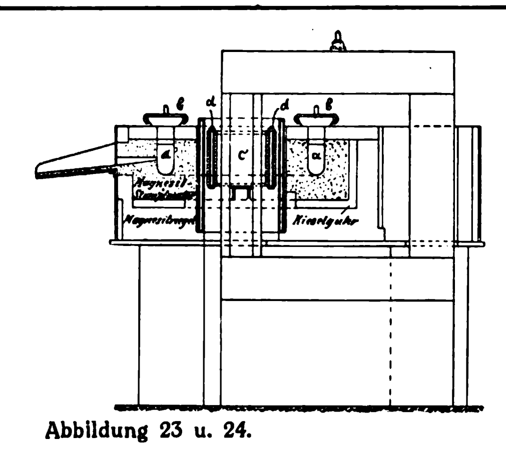


Abbildung 22. Héroult-Ofen.

Der Ofen von Héroult ist im Gegensatz dazu ein Serienofen. Die beiden Elektroden ragen von oben her in den Ofen hinein; der Strom geht von der einen Elektrode mit einem Lichtbogen zur Schlacke und von dieser mit einem zweiten Lichtbogen zur anderen Elektrode. Bei diesem Ofen, den Abbildung 21 im Schnitt und Abbildung 22 in Ansicht zeigt, wird demnach die oberste Schicht der Schmelze am höchsten erhitzt, während in dem Girod-Ofen



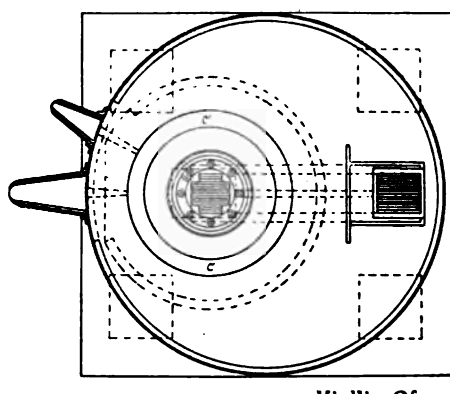


Abbildung 23 u. 24. Kjellin-Ofen.

der Strom von oben nach unten und gleichmäßiger durch die ganze Schmelze läuft. Wegen der guten Wärmeleitung des geschmolzenen Eisens verteilt sich aber auch beim Héroult-Ofen die Hitze genügend im Bade. Die Elektroden werden selbsttätig in 45 mm Entfernung von der Badoberfläche über dem Deckel durch Wasser gekühlt.

Abbildung 25. Röchling-Rodenhauser-Ofen.

Auf ganz anderem Prinzip beruhen die Induktionsöfen. Bei ihnen wird das Schmelzgut in einem ringförmigen Kanal durch Ströme erhitzt, die in ihm selbst durch die Einwirkung einer benachbarten, von starken Wechselströmen durchflossenen Spule hervorgerufen werden. Abbildung 23 u. 24 zeigen den Induktionsofen von Kjellin im Schnitt und in der Aufsicht. Eine kreisförmige Rinne aa bildet den Schmelzraum, der durch Deckel bb verschlossen wird. In diesen Ring greift ein viereckiger, aus Eisenblechen zusammengesetzter Rahmen (wie ein Kettenglied in das andere) ein; der innere Schenkel c dieses Rahmens trägt die induzierende Wicklung d; er wird durch Preßwind gekühlt. Das Ganze bildet einen großen Transformator, dessen einzige Sekundärwindung der Schmelzkanal ist. Sobald durch die primäre Wicklung ein genügend starker Wechselstrom geschickt wird, entsteht in der mit Eisen beschickten Schmelzrinne ein Induktionsstrom von geringer Spannung, aber gewaltiger Amperezahl, der das Eisen bis über seinen Schmelzpunkt erhitzt. Ein großer Vorzug des Induktionsofens liegt darin, daß er keine Elektroden besitzt; das Eisen kommt nur mit dem Ofenfutter in Berührung, so daß man einen Stahl von höchster Reinheit herstellen kann; ein zweiter Vorzug ist die gleichmäßige Erhitzung der Schmelze und die genaue Regelbarkeit der Bad-

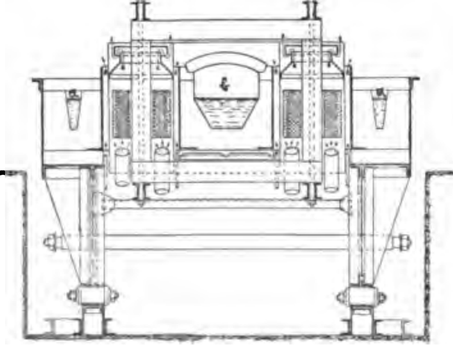


Abbildung 26. Röchling-Rodenhauser-Ofen.

temperatur. Für gute Durchmischung sorgt die mechanische Wirkung der Induktionsströme, welche das flüssige Eisen in lebhafte Rotation versetzen. Ein Nachteil des Kjellin-Ofens ist der schmale Schmelzraum, welcher ein Entschlacken sehr erschwert, so daß man den Ofen nicht mit unreinem Eisen beschicken kann, sondern ihn nur zum Umschmelzen benutzt. Ein zweiter Nachteil ist das geringe Fassungsvermögen des Herdes.



Abbildung 27. Abstich eines Röchling-Rodenhauser-Ofens für Elektrostahl.

Beide Nachteile vermeidet der kombinierte Induktionsofen von Röchling-Rodenhauser. Hier sind, wie Abbild. 25 in der Aufsicht und Abbildung 26 im Aufriß zeigen, beide Schenkel des induzierenden Rahmens mit Spulen versehen und von Schmelzrinnen a a umgeben, die sich in der Ofenmitte zu einem breiten Herd b vereinigen. Die Heizwirkung der Induktionsströme wird durch Widerstandsheizung des mittleren Herdes unterstützt, indem durch Stahlgußplatten c c, welche in das Ofenfutter eingelassen sind, ein niedriggespannter starker Strom in das Bad geleitet wird, welcher einer um die Schenkel des Rahmens gelegten zweiten Wicklung entnommen wird. Es ist nicht nötig, daß diese Polplatten mit der Schmelze in unmittelbarer Berührung sind; denn sobald der Ofen heiß ist, leitet das Ofenfutter den Strom (ähnlich wie der Glühkörper der Nernstlampe). Der breite Herd erlaubt ein gutes Entschlacken der Schmelze, so daß man billigen Eisenschrott als Einsatz verwenden kann. Zum Anheizen des Ofens werden flußeiserne Ringe in die Schmelzrinnen gelegt. Innerhalb vier Stunden ist der Herd hellrotglühend, und nun füllt man ihn mit flüssigem Roheisen aus dem Hochofen oder mit vorgereinigtem Eisen aus der Thomasbirne. Sobald das Eisen in gleichmäßigem Fluß ist, bringt man gebrannten Kalk und Eisenoxyd auf, um den im Eisen enthaltenen Phosphor zu entfernen. Nach einer Stunde zieht man diese „Frischschlacke" ab, wiederholt diese

Behandlung, bis der Phosphor genügend beseitigt ist, und bildet dann durch Aufbringen von Kalk die „Entschweflungsschlacke". Gleichzeitig setzt man dem Bade Ferrosilizium zu, um den in der Schmelze gelösten Sauerstoff zu entfernen. Sobald das Bad blasenfrei ist, kann man abstechen. Abbildung 27 zeigt den Abstich eines Röchling-Rodenhauser-Ofens.

Neuerdings sind derartige Öfen auch für Dreiphasenstrom gebaut worden, der sich für ihren Betrieb besonders gut eignet. In diesem Falle hat der induzierende Eisenrahmen drei mit Spulen versehene Kerne. Solche Öfen sind bis zu einem Fassungsvermögen von 8 t Eisen im Betrieb. Mit einem 8-t-Ofen kann man in 24 Stunden etwa 50 t Stahl raffinieren.

Im Jahre 1910 waren schon im ganzen über 100 elektrische Öfen in der Eisenindustrie tätig oder im Bau, davon etwa $^1/_3$ Induktionsöfen. In Deutschland sind Héroult-Öfen für 3000 kg Einsatz auf der Bismarckhütte (Oberschlesien) und auf dem Stahlwerk Lindenberg bei Remscheid im Betrieb; den größten Héroult-Ofen für 15000 kg besitzt die Illinois-Steel-Co. in South Chicago. Girod-Öfen für 10 bis 12 t Einsatz arbeiten bei Krupp in Essen, wo auch ein Kjellin-Ofen für 8,5 t im Betrieb ist. 4 Röchling-Rodenhauser-Öfen befinden sich auf den Röchlingschen Eisen- und Stahlwerken zu Völklingen an der Saar.

Die Raffinationskosten von 1 t flüssigem Stahl können auf 20 Mark geschätzt werden; muß das Eisen aber erst durch den elektrischen Strom geschmolzen werden, so betragen die Kosten mehr als das Sechsfache. Wegen dieser hohen Kosten des Einschmelzens sind auch die Versuche, geradenwegs aus dem Erz im elektrischen Ofen fertiges Eisen herzustellen, bisher meist ohne wirtschaftlichen Erfolg gewesen.

7. OZON

Die stille elektrische Entladung, die in Form von bläulichem Glimmlicht auftritt, wenn ein sehr hochgespannter Strom zwischen zwei durch einen Nichtleiter (Dielektrikum) getrennten Elektroden übergeht, vermag unter anderen chemischen Wirkungen auch den Sauerstoff in seine chemisch besonders wirksame Form Ozon überzuführen. Wegen seiner kräftigen Oxydationswirkung wird das Ozon zum Bleichen, zur Herstellung einiger künstlicher Riechstoffe und ganz besonders wegen seiner bakterientötenden Wirkung zur Sterilisation von Luft und Wasser angewendet.

Die Konstruktionen von mehr oder minder einfachen und praktischen Ozonapparaten sind sehr zahlreich. Aus der großen Fülle will ich nur zwei Apparate herausheben: den Ozoneur der Société française de l'Industrie chimique und die neueste Form des Ozonapparates von Siemens & Halske.

Abbild. 28. Ozoneur der Société française de l'Industrie chimique.

Der erstgenannte Apparat ist besonders einfach aufgebaut. Auf einer wagerechten Schieferplatte (Abbildung 28) liegt ein Blatt Aluminium — Aluminium widersteht unter den unedlen Metallen am besten dem Ozon —; darüber kommt eine Glasplatte, die durch zwischengelegte Glasstreifen in 3 mm Entfernung vom Aluminium gehalten wird. Die Oberseite der Glasplatte ist mit Stanniol bedeckt. Das Aluminiumblatt wird mit dem einen Pol, das Stanniol mit dem anderen Pol der Stromquelle verbunden.

Die Luft tritt seitlich in den Zwischenraum zwischen Aluminiumblatt und Glasplatte ein, belädt sich mit Ozon und wird durch ein Loch in der Mitte der Schieferplatte abgesogen. Da sich die Luft beim Durchtritt durch die Glimmentladung erwärmt, Temperaturerhöhung aber den Zerfall des entstandenen Ozons beschleunigt, so wird die Luft vor dem Ozonisieren durch Eis gekühlt. Weil feuchte Luft beim Abkühlen auf 0° den größten Teil ihres Wassergehalts als flüssiges Wasser abgibt, so dient diese Kühlung gleichzeitig zum Trocknen der Luft, welches die Ozonausbeute erhöht.

In der Fabrik zu Courbevoie sind 200 solcher Ozonapparate aufgestellt, jeder von 1 qm Elektrodenoberfläche, denen aus Transformatoren Strom von 12000 Volt zugeführt wird. Die gewonnene ozonhaltige Luft wird unter anderem zur Oxydation von Isoeugenol (aus Nelkenöl) benutzt, wobei Vanillin entsteht, der Stoff, dem die Vanilleschote ihr Aroma verdankt.

Der vielverbreitete Ozonapparat von Siemens & Halske besitzt eine konzentrische Anordnung der Entladungszelle. Die eine Elektrode besteht aus einem Aluminiumzylinder, der in kleinem Abstande von einem Glaszylinder umgeben ist; die äußere Belegung wird von dem Kühlwasser gebildet, das den Glaszylinder umspült. In dem Apparat (Abbild. 29) sind 6 solcher Glaszylinder in einem Kasten vereinigt. Die zu ozonisierende Luft wird durch die ringförmigen Zwischenräume zwischen Aluminiumpolen und Glaszylindern geleitet. Je langsamer die Luft durch den Apparat streicht, um so größer wird die Ozonkonzentration, aber um so kleiner auch die Stromausbeute; bei einem Gehalt von 2 bis 3 g Ozon im Kubikmeter Luft bekommt man auf die Kilowattstunde etwa 40 g Ozon.

Mischt man Flußwasser, das man zweckmäßig vorher durch Filtern von festen Absatzstoffen befreit hat, in Sterilisationstürmen innig mit ozonisierter Luft, so wird es rasch keimfrei; der vom Wasser aufgenommene Überschuß an Ozon wandelt sich sehr bald in gewöhnlichen Sauerstoff um. Außer einer Reihe kleinerer Anlagen sind in letzter Zeit große Ozonwasserwerke in Petersburg und Paris erbaut worden. In Petersburg werden durch eine Batterie von 120 Apparaten täglich 50000 cbm Newawasser sterilisiert. Abbildung 30 zeigt schematisch die Anordnung dieses Werkes. Aus dem Flusse wird das Rohwasser zunächst in Absatzbehälter gepumpt, wo ihm schwefelsaure Tonerde in geeigneter Verdünnung zugesetzt wird; die sich ausscheidende Tonerde reißt die vielen im Wasser vorhandenen Schwebestoffe mit sich. Durch Schnellfilter (System Howatson) gelangt das geklärte Wasser zu den Sterilisationstürmen und wird in diesen mit der aus den Ozonbatterien kommenden Luft, welche 2,5 g Ozon im cbm enthält, ausgiebig gemischt. Von den Türmen rieselt das Wasser über Entlüftungskaskaden zu den Reinwasserbehältern. Die Kosten der Ozonbehandlung betragen weniger als 1 Pfennig für das Kubikmeter Wasser.



Abbild. 29. Ozonapparat von Siemens & Halske. Neue Form.

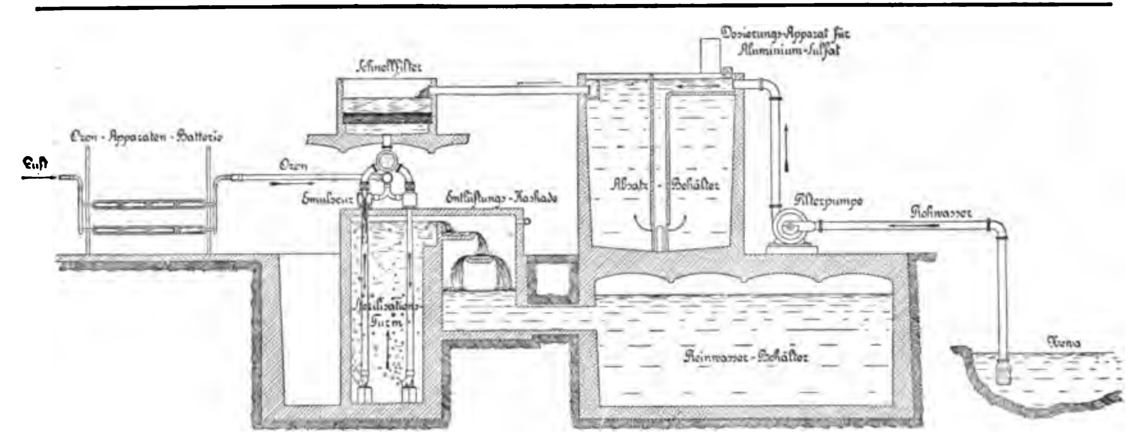


Abbildung 30. Schematische Darstellung des Ozonwasserwerks in St. Petersburg.

Zum Sterilisieren der Luft von Sälen u. dgl. werden neuerdings kleine Ozonapparate in die Lüftungsanlagen eingebaut.

DIE ZUKUNFT DER ELEKTROCHEMISCHEN INDUSTRIE. Angesichts ihrer gewaltigen Entwickelung schrieb man vor einem Jahrzehnt der elektrochemischen Industrie vielfach ungemessene Möglichkeiten zu; auch gegenwärtig denken nicht selten die glücklichen Besitzer von Wasserkräften zunächst daran, wie sie ihren Besitz am besten für elektrochemische Zwecke verwerten könnten. Leider liegen oft diese Wasserkräfte weitab von den großen Verkehrswegen, so daß der Absatz der Erzeugnisse und meist auch die Beschaffung der Rohstoffe erschwert ist; ferner ist der nutzbringende Ausbau einer Wasserkraft meist eine ziemlich kostspielige Sache — aus diesem Grunde ist z. B. am Niagara die elektrische Energie gar nicht so billig, wie vielfach geglaubt wird —; drittens ist in verschiedenen elektrochemischen Hauptprodukten der Bedarf durch die vorhandenen Fabriken bereits reichlich gedeckt, und viertens erfordert der erfolgreiche Betrieb elektrochemischer Werke vielfach besondere Erfahrungen. Freilich gehört kein besonderes Wissen dazu, um einen Bleichelektrolyseur nach Vorschrift zu behandeln; aber z. B. für die Fabrikation von Aluminium und von Karbid sind viele praktische Kenntnisse nötig, die zu erwerben auch die großen Firmen teures Lehrgeld gekostet hat. Man wird deshalb erst nach gewissenhafter Prüfung aller Umstände die Errichtung neuer elektrochemischer Werke empfehlen dürfen.

Zum Beispiel ist der sinnreich aufgebaute und ausgezeichnet arbeitende Ofen von Taylor zur Schwefelkohlenstofferzeugung in Penn Yan meines Wissens seit zehn Jahren der einzige seiner Art geblieben, weil zwar an vielen Orten Nachfrage nach Schwefelkohlenstoff herrscht, aber meist nur geringe Mengen gebraucht werden, die man auf die alte Art in kleinen Apparaten herzustellen pflegt. Die Anwendung des elektrischen Ofens in der Glasindustrie hat sich anscheinend bisher nur in einem besonderen Falle, bei der Herstellung von Quarzglas, eingebürgert, bei welcher eine besonders hohe Temperatur nötig ist. Die elektrolytische Entzinnung von Weißblech ist neuerdings durch die rein chemische Entzinnung mit trockenem Chlorgas wieder zurückgedrängt worden, weil dieses Verfahren vorteilhafter arbeitet. Das aus Golderzen mit Zyankali ausgelaugte Gold wird gegenwärtig nicht mehr wie früher durch den elektrischen Strom abgeschieden, sondern mit Zink ausgefällt. Die elektrochemische Gewinnung von Jodoform und anderen Produkten der organischen

Chemie ist bisher nicht über Versuchsbetriebe hinausgekommen; denn so leicht es ist, z. B. aus Nitrobenzol mit Hilfe der elektrolytischen Reduktion Anilin herzustellen, so erfordert doch das elektrochemische Verfahren mehr Raum und Zeit, als wenn man mit den als Abfall billig zu beschaffenden Gußeisenspänen reduziert.

Freilich hat die elektrochemische Arbeitsweise meist einen bestechenden Vorzug: sie belastet den Betrieb nicht so sehr mit Abfällen wie viele chemische Verfahren. Diesem Vorzuge verdankt unter anderem die Alkalichloridelektrolyse ihre großen Erfolge.

Von neueren elektrolytischen Prozessen, welche in die Großindustrie schon Eingang gefunden haben, die ich aber aus Mangel an Raum nicht besprechen konnte, ist die Fabrikation der überschwefelsauren Salze und die Aufarbeitung der Manganatlaugen zu übermangansaurem Kali zu nennen, welches in der Fabrikation organischer Farbstoffe eine Rolle spielt.

Aussichtsreich erscheint auch die elektrothermische und die elektrolytische Zinkabscheidung aus Erzen; die direkte Gewinnung von Kupfer aus Erz soll sich in einem besonderen Falle bereits dauernd bewähren; ebenso hat die Verhüttung von Nickelerzen im elektrischen Ofen wohl eine Zukunft. Kurzum, trotz einzelner Rückschritte und Mißerfolge darf die elektrochemische Industrie getrost in die Zukunft blicken. Neue Erfindungen werden ihr neue Wege erschließen und alte Verfahren verbessern. Ein solches Problem, an dessen Lösung gegenwärtig eifrig gearbeitet wird, ist das Auffangen und die Verwertung des Kohlenoxyds, das den Karbidöfen bisher ungenutzt in riesigen Mengen entströmt. Dieses Problem wird sicherlich ebenso erfolgreich zu lösen sein wie seinerzeit die ähnliche Aufgabe, die Ausnutzung der dem Hochofen entströmenden Gichtgase, welche früher nutzlos vergeudet wurden und jetzt eine hochgeschätzte und vielbenutzte Quelle billiger Energie darstellen.

